

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

Vodíkové technologie v systému akumulace elektřiny  
Hydrogen technologies in electrical energy storage  
system

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Váňa**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Vodíkové technologie v systému akumulace elektřiny**  
**Hydrogen technologies in electrical energy storage system**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky vodíkových technologií
2. Elektrolytická výroba vodíku a jeho uskladnění
3. Využití vodíku v palivových článcích k výrobě elektřiny
4. Vodíkové technologie jako alternativa k systémům akumulace elektřiny

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Tuček, V., Dvořáková, L., Hanzal, J.: Vodík, Česká asociace technických plynů, Praha, 2004.
2. Doucek, A., Tenkrát, D., Dlouhý, P.: Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie, časopis Paliva, 2010.
3. Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi, FCC Public.
4. Barin, A. and col.: Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection, Journal of Energy and Power Engineering, 2011.
5. Sokanský, K.: Palivové články v energetice, Ostrava, 2007.
6. Socha, B.: Bivalentní provoz palivových a fotovoltaičických článků za účelem výroby a akumulace elektrické energie, Bakalářská práce, Ostrava, 2011.
7. Bilíček, P.: Problematika větrných a fotovoltaičických zdrojů v distribučních sítích, Diplomová práce, Ostrava, 2011.
8. Srinivasan, S.: Fuel cells : from fundamentals to applications, New York, 2006
9. Vodíkové technologie <<http://www.hytep.cz/>>
10. ESA <<http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



---

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



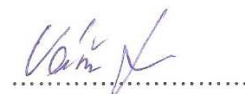
---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Přerově dne: 11. 4. 2017

  
.....  
podpis studenta

## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval za cenné odborné rady a připomínky vedoucímu této bakalářské práce Ing. Petru Moldříkovi Ph.D.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá současnými technologickými možnostmi akumulace energie do vodíku, zejména pak jeho využitím v energetice. Práce obsahuje jak teorii k dané problematice, tak praktickou část, ve které jsou analyzována data z laboratoře palivových článků VŠB-TU Ostrava.

Teorie zahrnuje kapitoly 1 až 6 a jsou v nich postupně probrány jednotlivé technologické procesy, od výroby vodíku, přes jeho skladování až po jeho využití v palivových článcích k výrobě elektrické energie. Popis výroby vodíku je zaměřen zejména na získávání vodíku elektrolýzou vody, ale také jsou zde uvedeny i jiné možnosti jeho výroby. V technologiích skladování jsou popsány jak konvenční, léty osvědčené technologie skladování, tak technologie alternativní, které se nacházejí stále ve fázi výzkumu a vývoje. Dále práce obsahuje popis jednotlivých typů palivových článků, ve kterých probíhá přeměna vodíku na elektrickou energii. V závěru teoretické části najdeme porovnání různých technologií akumulace energie a také jsou zde uvedeny již některé realizované projekty akumulace energie do vodíku.

Praktická část práce je obsažena v kapitole 7 a jsou v ní analyzována data z měření na elektrolýzeru Hogen GC600 a modulu palivových článků NEXA Power Module.

## **Klíčová slova**

Vodík, akumulace, palivový článek, elektrolýza, skladování vodíku, PEMFC, AFC, PAFC, DMFC, MCFC, SOFC

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with current technological capabilities in accumulation of energy into hydrogen, especially its use in energetics. Also it includes theory of this problematic and practical sections in which are analyzed data from the laboratory of the fuel cells VŠB-TU Ostrava.

The theory includes Chapters 1 to 6 in which are gradually discussed technological processes from production of hydrogen through its storage and its use in fuel cells to produce electricity. Description of hydrogen production is mainly directed to the production of hydrogen by electrolysis of water, but there are other options for its production. The technologies of storage are described as conventional methods, well proven technologies of storage, but also alternative technologies that are still in the stage of research and development. Further this thesis includes a description of the various types of fuel cells, in which takes place the conversion of hydrogen into electrical energy. In the end of the theoretical part there are comparisons of different technologies of accumulation in energy and also here are presented some already realized projects of accumulation of energy into hydrogen.

Practical work is included in Chapter 7 in which are analyzed data from measurements Hogen GC600 electrolyser and fuel cell module NEXA Power Module.

## **Key words**

Hydrogen, accumulation, fuel cell, electrolysis, hydrogen storage, PEMFC, AFC, PAFC, DMFC, MCFC, SOFC

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam použitých jednotek a označení</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>11</b>
<b>Seznam grafů</b> .....	<b>11</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Úvod do vodíkových technologií</b> .....	<b>13</b>
1.1 Historie vodíkových technologií.....	13
1.2 Vodík .....	13
1.2.1 Izotopy vodíku.....	14
1.2.2 Výskyt v přírodě .....	14
1.2.3 Vlastnosti a použití vodíku .....	15
<b>2. Výroba vodíku</b> .....	<b>17</b>
2.1 Elektrolýza vody .....	18
2.1.1 Alkalické elektrolyzéry .....	18
2.1.2 Elektrolyzéry s PEM membránou.....	18
2.1.3 Vysokoteplotní elektrolyzéry s pevným elektrolytem (SOEC).....	19
2.2 Výroba vodíku z fosilních paliv .....	20
2.2.1 Parní reforming (SMR).....	20
2.2.2 Parciální oxidace (POX).....	21
2.2.3 Zplyňování pevných fosilních paliv .....	21
2.3 Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů a elektrické energie .....	21
2.3.1 Výroba vodíku z biomasy.....	22
2.3.2 Termochemické cykly .....	22
2.3.3 Ostatní způsoby výroby .....	22
<b>3. Skladování vodíku</b> .....	<b>23</b>
3.1 Konvenční technologie uskladnění.....	23
3.1.1 Skladování vodíku v plynné fázi .....	23
3.1.2 Skladování vodíku v kapalně fázi.....	23
3.2 Alternativní technologie uskladnění .....	24
3.2.1 Metalhydridy a hydridy alkalických zemin .....	24
3.2.2 Ostatní metody skladování .....	24
<b>4. Přeměna vodíku na elektrickou energii v palivových článcích</b> .....	<b>25</b>

4.1 Princip palivového článku .....	25
4.2 Typy a rozdělení palivových článků.....	26
4.2.1 Alkalické palivové články (AFC).....	27
4.2.2 Palivové články s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC).....	28
4.2.3 Palivové články s přímým zpracováním metanolu (DMFC).....	29
4.2.4 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC).....	29
4.2.5 Palivové články s elektrolytem na bázi roztavených uhličitů (MCFC) .....	29
4.2.6 Palivové články s elektrolytem na bázi pevných oxidů (SOFC) .....	30
4.3 Výhody a nevýhody palivových článků .....	31
<b>5. Vodíkové technologie v porovnání s jinými systémy akumulace elektřiny.....</b>	<b>33</b>
5.1 Systémy akumulace elektrické energie.....	33
5.1.1 Mechanická akumulace .....	34
5.1.2 Elektrochemická akumulace.....	36
5.1.3 Elektromagnetická akumulace.....	37
5.2 Akumulace energie do vodíku .....	38
5.3 Porovnání různých systémů akumulace elektrické energie .....	39
5.4 Perspektiva akumulace do vodíku .....	41
<b>6. Realizované projekty.....</b>	<b>43</b>
6.1 Vodíkové technologie v ÚJV Řež .....	43
6.2 Utsira (Norsko) .....	44
6.3 Energiepark Mainz (Německo).....	45
<b>7. Analýza dat z hybridního akumulčního systému .....</b>	<b>47</b>
7.1 Popis systému .....	47
7.2 Analýza dat naměřených na elektrolyzáru Hogen GC600.....	51
7.3 Analýza dat naměřených na modulu palivového článku .....	53
<b>Závěr.....</b>	<b>58</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>59</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>62</b>

## Seznam použitých zkratk

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
AC	Označení střídavého proudu
A/D	Analogově digitální převodník
AFC	Alkalické palivové články
CAES	Akumulace energie do stlačeného vzduchu
CAS	Registrační číslo chemických látek
DMFC	Palivové články s přímým zpracováním metanolu
DC	Označení stejnosměrného proudu
ES	Označení látky ES číslem
hm.	Hmotnost
KOH	Hydroxid draselný
MCFC	Palivový článek s elektrolytem na bázi roztavených uhličitů
NASA	Americký národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NN	Nízké napětí
PEMFC	Palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou
PČ	Palivový článek
PVE	Přečerpávací vodní elektrárny
ppm.	Výraz pro jednu miliontinu
SMES	Systém uskladnění energie v magnetickém poli
SOEC	Vysokoteplotní elektrolýza s pevnými oxidy
SOFC	Vysokoteplotní palivový článek s pevnými oxidy
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
UN	Identifikační označení látek
UPS	Zdroj nouzového napájení
VPČ	Vysokoteplotní palivový článek
VŠB-TU	Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava



## Seznam použitých jednotek a označení

Značka	Jednotka	Význam
$E_k$	(kWh)	Kinetická energie
$E$	(MWh)	Energie
$g$	( $m.s^{-2}$ )	Tíhové zrychlení
$J$	( $kg.m^2$ )	Moment setrvačnosti
$m$	(kg)	Hmotnost
$P$	(MPa)	Tlak
$P$	(bar)	Tlak
$P$	(MW)	Výkon
$P$	(Wp)	Výkon fotovoltaické elektrárny při standardních testovacích podmínkách
$l$	(m)	Délka
$Q$	(Ah)	Elektrický náboj
$S$	(kVA)	Zdánlivý elektrický výkon
$T$	(K)	Termodynamická teplota
$t$	(°C)	Teplota
$U$	(V)	Elektrické napětí
$u$	(-)	Unifikovaná atomová hmotnostní jednotka
$V$	(l)	Objem
$V$	( $m^3$ )	Objem
$W_p$	(J)	Potenciální energie
$\omega$	( $rad.s^{-1}$ )	Úhlová rychlost

Poznámka:

Další symboly a zkratky se v textu vyskytují jen s jejich vysvětlením.

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Suroviny na výrobu vodíku [15] .....	17
Obr. 2 Princip elektrolýzy vody [13] .....	18
Obr. 3 PEM elektrolyzátor od firmy Areva [30] .....	19
Obr. 4 Zjednodušené schéma základních metod výroby vodíku z fosilních paliv [1] .....	20
Obr. 5 Schéma parního reformování zemního plynu [18].....	21
Obr. 6 Princip palivového článku PEM [1] .....	25
Obr. 7 Účinnost jednotlivých systémů při výrobě elektrické energie [13].....	32
Obr. 8 Technologie akumulace elektrické energie [7] .....	33
Obr. 9 Přecherpací vodní elektrárna Dlouhé Stráně [3] .....	34
Obr. 10 Konstrukce válcového Ni-MH článku [4].....	36
Obr. 11 Princip akumulace elektrické energie do vodíku [25].....	38
Obr. 12 Schéma akumulace ve spojení s OZE a elektrickou sítí [1].....	39
Obr. 13 Vyspělost technologií akumulace využitelných pro síťový provoz [32] .....	40
Obr. 14 Vyspělost jednotlivých vodíkových technologií [29] .....	41
Obr. 15 Zařízení pro akumulaci elektrické energie do vodíku v areálu ÚJV Řež [35].....	43
Obr. 16 Demonstrační zařízení akumulace energie do vodíku na ostrově Utsira [38].....	44
Obr. 17 Princip akumulace větrné energie do vodíku na ostrově Utsira [44] .....	45
Obr. 18 Vodíkové technologie v Energiepark Mainz [37].....	46
Obr. 19 Blokové schéma hybridního akumulčního systému v laboratoři palivových článků .....	47
Obr. 20 Modul palivových článků NEXA v laboratoři palivových článků.....	48
Obr. 21 Elektrolyzátor Hogen GC600.....	50
Obr. 22 Tlakové lahve pro uskladnění vodíku .....	50
Obr. 23 Princip měření na elektrolyzátoru .....	51
Obr. 24 Měření na modulu palivových článků NEXA.....	54

## Seznam tabulek

Tab. 1 Fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku [12] .....	15
Tab. 2 Označení čistoty vodíku [6] .....	17
Tab. 3 Srovnání různých typů palivových článků [13] .....	26
Tab. 4 Porovnání technických parametrů akumulátorů, kondenzátorů a superkapacitorů [9] .....	38
Tab. 5 Porovnání vybraných technologií akumulace elektrické energie [28] [31] [32] [33] [34].....	40
Tab. 6 Technické parametry systému [35] .....	44
Tab. 7 Čas a spotřebovaná energie při zahřívání a tlakování systému .....	51
Tab. 8 Množství vyrobeného vodíku v závislosti na čase a spotřebované energii .....	52
Tab. 9 Naměřené hodnoty na palivovém článku a určená účinnost .....	54
Tab. 10 Naměřené hodnoty na palivovém článku .....	55

## Seznam grafů

Graf 1 Spotřeba elektrické energie elektrolyzérů při startu zařízení.....	52
Graf 2 Spotřeba elektrické energie elektrolyzérů při výrobě vodíku .....	52
Graf 3 Závislost účinnosti palivové článku na jeho zatížení („netto“ výkon).....	56
Graf 4 Závislost vlastní spotřeby a vyrobené energie na výkonu článku.....	56
Graf 5 V-A charakteristika modulu palivového článku .....	56
Graf 6 Zatěžovací charakteristika modulu palivových článků .....	57
Graf 7 Spotřeba vodíku, vzduchu a výroba vody v závislosti na výkonu modulu .....	57

## Úvod

Omezené zásoby fosilních paliv, předpoklad růstu jejich cen z dlouhodobého hlediska a ekologie jsou jedny z hlavních důvodů pro růst významu obnovitelných zdrojů elektrické energie. Zejména podíl solárních a větrných elektráren na celkové výrobě elektrické energie poslední roky rychle roste. Tyto zdroje produkují čistou elektrickou energii, ale bohužel jsou závislé zejména na meteorologických podmínkách, a tedy i jejich produkce elektrické energie není v časovém měřítku konstantní. Spolu s nerovnoměrným zatížením rozvodné sítě v průběhu dne vyvstává problém, jak hospodárně vyrovnat výrobu a spotřebu. Jednou z možností je energii v době přebytku uskladnit na jinou formu a poté ji při nedostatku zpět přeměnit na elektrickou energii. Způsobů, jak akumulovat energii existuje mnoho. Každý z těchto způsobů má své výhody a nevýhody. V současnosti je v energetice nejpoužívanější způsob akumulace do potenciální energie vody ve vodních přečerpávacích elektrárnách. V poslední době se však objevují nové technologie skladování energie, které by v budoucnu mohly mít velký potenciál. Jednou z těchto technologií je akumulace energie do vodíku.

Cílem této práce je rozebrat současné technologické možnosti akumulace energie do vodíku, zejména pak v energetice a nastínit jejich perspektivu. Postupně budou probrány jednotlivé technologické procesy od výroby vodíku, přes jeho skladování až po přeměnu vodíku na elektrickou energii. Vodík lze vyrábět mnoha různými způsoby. Avšak dnes nejpoužívanější výroba pomocí fosilních paliv pro využití v energetice nemá příliš smysl a je trvale neudržitelná. Pouze při produkci vodíku z obnovitelných zdrojů se projeví jeho výhoda jako trvale udržitelného zdroje. Oproti dnes tradičně využívaným způsobům akumulace elektrické energie pro velkovýrobu, má vodík výhodu v tom, že ho lze dlouhodobě skladovat ve větším množství. Zpětná přeměna na elektrickou energii pak probíhá v palivových článcích, jež přeměňují přímo chemickou energii na elektrickou a tím mají vyšší účinnost než spalování vodíku klasickým způsobem.

Komerční využití těchto technologií je teprve na svém začátku a pro jejich širší využití se musí investovat nemalé peníze na vybudování potřebného zázemí a infrastruktury. Tento obor čeká v příštích letech další rozvoj a bude potřeba také vyřešit spoustu technologických problémů. Ale přednosti vodíku jako nosiče energie jsou takové, že v budoucnosti můžeme očekávat jeho široké využití nejen v energetice. Velký potenciál má pro využití v dopravě a dalších mobilních aplikacích např. napájení malých přenosných elektrických spotřebičů, jako jsou notebooky či mobilní telefony.

# 1. Úvod do vodíkových technologií

Vodík a vodíkové technologie jsou jedním z možných řešení pro budoucnost energetiky jako trvale udržitelný, ekologicky čistý zdroj elektrické energie. Elektrická energie vyrobená pomocí vodíkových technologií může být v širokém rozsahu výkonů. Počínaje napájením malých přenosných spotřebičů, přes využití v dopravě pro pohon elektromobilů až po velké stacionární jednotky velkých výkonů, sloužící jako výkonová záloha pro krytí energetických špiček. Vodíkové technologie v sobě zahrnují technologické procesy – výrobu vodíku, jeho uskladnění a následnou přeměnu na elektrickou energii v palivových článcích. Aby vodíkové hospodářství bylo ekologicky čisté a trvale udržitelné, je potřeba vyrábět vodík za pomoci energie získané z obnovitelných zdrojů. Jedním z možných řešení může být spojení solárních či větrných elektráren s elektrolytickou výrobou vodíku. Výhody vodíku oproti jiným palivům jsou zejména tyto:

- Ekologicky čistý zdroj, spalováním vodíku vzniká pouze čistá voda
- Výhodný poměr hmotnosti a získané energie
- Lze ho jednoduše (ale energeticky náročně) získávat elektrolýzou z obyčejné vody
- Možnost přímé přeměny chemické energie na elektrickou v palivových článcích
- Jeho zásoby jsou téměř nevycerpitelné

## 1.1 Historie vodíkových technologií

Mezi hlavní milníky ve vývoji vodíkových technologií a především palivových článků lze zařadit následující události:

- 1766 – objev vodíku britským fyzikem a chemikem Henry Cavendishem.
- Kolem roku 1800 je uskutečněna elektrolýza vody.
- 1838 – objev principu palivového článku švýcarským vědcem Christianem Schönbeinem.
- 1839 – na základě teoretického objevu Christiana Schönbeina sestrojil Sir William Robert Grove první palivový článek.
- 1889 – Charles Langer a Ludwig Mond se pokusili sestrojit článek používající jako palivo svítíplyn. Pro tento článek poprvé použili termín „palivový článek“.
- 1932 – Francis Thomas Bacon vyvinul první kyslíko-vodíkový článek, kde jako elektrolyt použil hydroxid draselný, roku 1952 Baconův článek již disponuje výkonem 5 kW.
- 60. léta 20. století – NASA využívá palivových článků v kosmických Gemini a Apollo. Později je také využívá v raketoplánech.

Využití palivových článků v kosmických lodích NASA v šedesátých letech minulého století započalo intenzivnější vývoj palivových článků a jejich větší využití v mnoha různých aplikacích. [21] [22]

## 1.2 Vodík

Vodík (chemická značka H) je prvním členem přirozené řady prvků, jehož atomové jádro tvoří jeden proton. Jedná se o bezbarvý, lehký plyn bez chuti a zápachu, jež je nejčastěji zastoupeným prvkem v celém vesmíru. Podle současných měření je jeho podíl 75 % na hmotě a 90 % na počtu atomů. Je více než 14 krát lehčí než vzduch a vede teplo 7 krát lépe než vzduch. Vodík je velmi reaktivní a vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky s výjimkou vzácných plynů, zejména pak s uhlíkem, kyslíkem, sírou a dusíkem, které jsou základní stavební jednotky života na Zemi.

Velmi reaktivní je především s lehkými halogeny a kyslíkem, kde je ovšem pro spuštění této reakce nutná inicializace (např. jiskra, která zapálí kyslíko-vodíkový plamen). Vodík může tvořit zvláštní typ chemické vazby, nazývaný vodíková vazba nebo též vodíkový můstek, kdy vázaný atom vodíku vykazuje afinitu i k dalším atomům, s nimiž není poután klasickou chemickou vazbou. Mimořádně silná je vodíková vazba s atomy kyslíku, což vysvětluje anomální fyzikální vlastnosti vody (vysoký bod varu a tání atd.). Vodík má také schopnost „rozpouštět“ se v některých kovech např. v palladiu a platině, které poté fungují jako katalyzátory chemických reakcí. To je způsobeno tím, že vodík má velmi malé molekuly, které mají schopnost procházet různými materiály. Těto vlastnosti vodíku je využíváno v některých typech palivových článků. [10] [11]

### **1.2.1 Izotopy vodíku**

Vodík je tvořen směsí tří základních izotopů a jediný prvek, jehož izotopy mají svá jména.

#### **Protium (lehký vodík)**

Je nejjednodušší atom ve vesmíru a představuje jeho převážnou část. Je tvořen jedním protonem a jedním elektronem. [10]

#### **Deuterium (těžký vodík)**

V průměru připadá na jeden atom deuteria 7000 atomů vodíku. Jádro obsahuje jeden neutron a jeden proton. Od běžného vodíku se liší zejména atomovou hmotností, která činí 2,01363 u. Deuterium je stabilní izotop, který nepodléhá radioaktivní přeměně. Ve spojení s kyslíkem tvoří deuterium tzv. těžkou vodu, která je používána v jaderném průmyslu jako moderátor v jaderných reaktorech ke zpomalování rychlosti neutronů. [10]

#### **Tritium (radioaktivní vodík)**

Je radioaktivní izotop vodíku. Jádro je složeno ze dvou neutronů a jednoho protonu. Jeho relativní atomová hmotnost činí 3,016049 u. Na rozdíl od deuteria je jádro tritia nestabilní a má poločas rozpadu 12,33 roků. Tritium se vlivem ionizujícího vesmírného záření vyskytuje v horních vrstvách zemské atmosféry a ve stopovém množství i v obyčejné vodě. Tritia se využívá jako trvalého zdroje slabého světla, když plynné tritium je uzavřeno v skleněných mikrokapslích, na jejichž stěně je vrstva fosforeskující látky, která vlivem dopadajícího záření svítí. Používá se například u ciferníků hodinek. [10]

### **1.2.2 Výskyt v přírodě**

Elementární vodík se na Zemi vyskytuje jen vzácně a to zejména v sopečných plynech. V našem prostředí se plynný vodík nachází ve formě dvouatomových molekul  $H_2$ , avšak v mezihvězdném prostoru se vyskytuje jako atomární vodík H. Díky své nízké měrné hmotnosti se v zemské atmosféře nachází pouze v horních vrstvách. Elementární vodík je jednou z hlavních složek zemního plynu a můžeme ho najít i v uhlí. V přírodě se pak převážně vyskytuje ve formě sloučenin a to hlavně vody. Organické sloučeniny jsou dalším významným zdrojem vodíku. Spolu s uhlíkem, kyslíkem a dusíkem patří mezi prvky potřebné pro život tzv. biogenní prvky. [10]

### 1.2.3 Vlastnosti a použití vodíku

Základní fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 1 Fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku [12]

Chemický vzorec	H <sub>2</sub>
Molekulová hmotnost	2,01588 g/mol
Bod tání (při tlaku 101,3 kPa)	-259,2 °C
Bod varu (při tlaku 101,3 kPa)	-252,7 °C
Kritická teplota	-239,9 °C
Kritický tlak	1,29 MPa
Hustota plynu (při 0 °C, 101,3 kPa)	0,08987 kg/m <sup>3</sup>
Relativní hustota plynu (vzduch=1)	0,07
Teplota vznícení cca.	520 °C
Dolní mez výbušnosti se vzduchem	4 obj. %
Horní mez výbušnosti se vzduchem	75 obj. %
Výhřevnost	10 789 kJ/m <sup>3</sup>
Rozpustnost ve vodě (při 0 °C)	1,9 mg/l
MESG (mezně bezpečnostní spára)	0,28 mm
Rozpustnost ve vodě (při 0 °C, 101,3 kPa)	1,9 mg/l
Barva	bezbarvý
Zápach	bez zápachu
UN	1049 VODÍK, STLAČENÝ
CAS	333-74-0
ES	No: 215-605-7
Označení nebezpečnosti	1 F
Teplotní třída	T1
Skupina výbušnosti	II C

Vodík je obnovitelnou surovinou a jeho zásoby jsou téměř nevyčerpatelné. Mezi jeho přednosti patří vysoká hustota energie vzhledem k hmotnosti, dá se skladovat a transportovat. Proto má vodík v budoucnu velký potenciál stát se primárním zdrojem energetiky a automobilového průmyslu. Využívá se však i v současnosti ve velké škále oborů jako například: [10] [12]

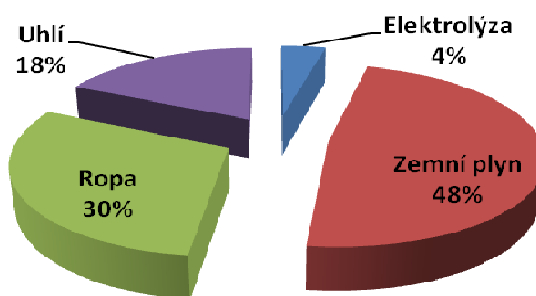
- Metalurgický průmysl – Nejčastěji je zde vodík využíván jako součást ochranných atmosfér při výrobě uhlíkové oceli, slitin na bázi mědi, barevných kovů. Dále pak při tvrdém pájení pro dosažení optimální pevnosti a při spékání kovů.
- Sklářský průmysl – Jako součást ochranné atmosféry cínové lázně pro plavení plochého skla a také jako topné médium při zpracování tvrdých skel plamenem.
- Chemický a potravinářský průmysl – Vodík je zde výborným redukčním činidlem sloužícím k sycení násobných vazeb organických molekul, např. při ztužování rostlinných olejů.

- Elektrotechnický průmysl – Jako součást ochranné atmosféry při redukci oxidu křemičitého při výrobě silikonových destiček pro integrované obvody, dále se využívá vodík jako reagující složky a nosného plynu při výrobě bipolárních integrovaných obvodů.
- Ostatní využití – Pro výhodný poměr chemická energie – hmotnost, je vodík využíván v kosmickém průmyslu pro pohon raketových motorů.



## 2. Výroba vodíku

I přesto, že vodík je nejhojnějším prvkem ve vesmíru, tak na Zemi se volně nevyskytuje, neboť v případě výskytu okamžitě reaguje s ostatními prvky. Proto je převážná většina vodíku na Zemi vázaná v molekulárních sloučeninách. Výroba vodíku znamená tedy vyseparovat jej z těchto molekul. Vodík se snáze dostává ze sloučenin, které jsou na vyšší energetické úrovni, jako např. fosilní paliva a proces získávání vodíku z těchto paliv nazýváme reforming. Při tomto procesu je uvolňována energie a současně dochází ke snížení množství požadované procesní energie. V současnosti tato produkce vodíku jednoznačně dominuje, jak je patrné z Obr. 1. Daleko větší energie je potřeba v případě získávání vodíku ze sloučenin s nižší energií, jako je například voda. Proces výroby vodíku z vody pomocí elektrochemických procesů se nazývá elektrolýza a při tomto procesu musíme energii dodávat. Jedná se o jednodušší technologii ve srovnání s reformingem, avšak díky vysoké energetické náročnosti zatím výrazně finančně náročnější. Přesto má tento způsob výroby ve spojení s obnovitelnými zdroji elektrické energie velký potenciál, jelikož se jedná o bezemisní způsob získávání vodíku. Dále existuje několik dalších způsobů výroby vodíku jako například zplyňování biomasy, termochemické štěpení vody a další. Některé z nich budou probrány v následujících podkapitolách. [13]



Obr. 1 Suroviny na výrobu vodíku [15]

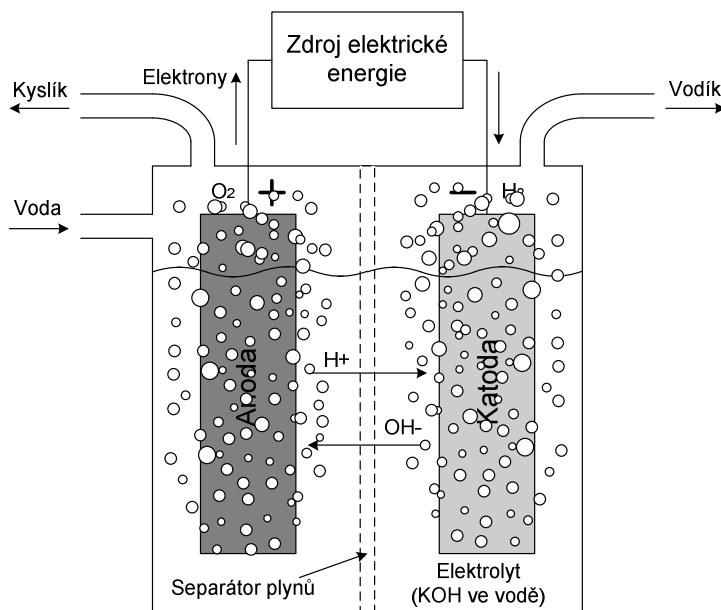
Velmi důležitým parametrem kvality vodíku je také jeho čistota, případně množství nečistot, které obsahuje. Běžně dodávaný plynný vodík má čistotu 3.0 a 4.0. Pro speciální účely bývá dodáván vodík i o vyšší čistotě 4.5–7.0. Pro bližší informaci o označení čistoty vodíku je přiložena Tab. 2 Tab. 2 Označení čistoty vodíku [6]. Nejčastějšími nečistotami, které se ve vodíku vyskytují, jsou: vodní pára, kyslík, dusík, CO, CO<sub>2</sub> a uhlovodíky. [6]

Tab. 2 Označení čistoty vodíku [6]

označení	čistota plynů	zbytkové nečistoty	zbytkové nečistoty
2.0	99 %	10 000 ppm	1 %
3.0	99,9 %	1000 ppm	0,1 %
3.5	99,95 %	500 ppm	0,05 %
4.8	99,998 %	20 ppm	0,002 %
5.0	99,999 %	10 ppm	0,001 %
5.5	99,9995 %	5 ppm	0,0005 %
7.0	99,99999 %	0,1 ppm	0,00001 %

## 2.1 Elektrolýza vody

Elektrolytické štěpení vody je jednou z nejsnadnějších možností výroby vodíku. Jde o proces, kdy vlivem průchodu proudu vodným roztokem dochází ke štěpení chemické vazby mezi vodíkem a kyslíkem. Vodík je vylučován na katodě a kyslík jako vedlejší produkt na anodě. Nejpoužívanější elektrolytická metoda je na alkalické bázi. V současnosti se ale perspektivněji jeví metody založené na výměně protonů přes membránu (PEM) nebo vysokoteplotní elektrolýza s pevnými oxidy (SOEC). Výhodou jakékoliv metody elektrolýzy je, že produkuje vysoce čistý vodík a neprodukuje žádné  $\text{CO}_2$ , nicméně je dosti energeticky náročná. [16]



Obr. 2 Princip elektrolýzy vody [13]

### 2.1.1 Alkalické elektrolýzéry

Alkalická elektrolýza je v současnosti nejpokročilejší technologií elektrolýzy. Je již delší dobu úspěšně provozována v průmyslu, a to i v modulech o výkonu v řádu MW. Její výhodou jsou nízké investiční náklady a relativně vysoká spolehlivost a životnost. Nevýhodou je pak nižší účinnost a flexibilita provozu. Proto je její uplatnění především ve velkokapacitních stacionárních systémech. Jako elektrolyt se používá hydroxid draselný (KOH) o koncentraci 25–30 hm. % při teplotě do 90 °C. Katoda je obvykle vyrobená z niklu, potažená tenkou vrstvou platiny, sloužící jako katalyzátor. Anoda bývá často rovněž vyrobena z niklu, ale používá se i měď s vrstvou manganu, ruthenia nebo wolframu. Účinnost se pohybuje na hranici 60 %, čistota produkovaného vodíku je přibližně 99,5 % a životnost je uváděna kolem 90 tisíc provozních hodin. [16] [40] [42]

### 2.1.2 Elektrolýzéry s PEM membránou

Tato technologie není tak vyspělá jako alkalická elektrolýza, nicméně má řadu výhod a v příštích letech se dá očekávat další technologický pokrok. PEM elektrolýza je tzv. kyselá elektrolýza s pracovní teplotou přibližně 90 °C, která jako elektrolytu využívá pevné proton-výměnné membrány (PEM – Proton Exchange Membrane).



Obr. 3 PEM elektrolýzér od firmy Areva [30]

Membrána o tloušťce 100 až 200  $\mu\text{m}$  (nejčastěji Nafion) odděluje anodu od katody a plní i funkci rozdělování kyslíku a vodíku. Na anodě dochází ke štěpení vody na protony a kyslík. Protony následně putují skrz membránu k záporné elektrodě, kde vlivem redukce protonů s elektrony, které jsou dodávány vnějším zdrojem, dochází ke vzniku vodíku. Takto vyrobený vodík má vysokou čistotu kolem 99,9 %. Další výhodou tohoto typu elektrolýzy je její vysoká flexibilita. Proto se tento typ hodí ve spojení s velmi dynamickými zdroji elektrické energie, jako jsou větrné nebo fotovoltaické elektrárny. Účinnost této metody elektrolýzy se blíží 70 %. Naopak nevýhodou je materiálová náročnost elektrod a nutnost použití drahých platinových kovů jako katalyzátoru, což značně prodražuje tento typ elektrolýzérů. Životnost je přibližně 20 až 60 tisíc hodin a dá se očekávat komerční využití v nejbližších letech. [16] [40] [42]

### 2.1.3 Vysokoteplotní elektrolýzéry s pevným elektrolytem (SOEC)

Tento typ elektrolýzy je dosud na nejnižším stupni technického vývoje oproti předcházejícím metodám. To je zejména způsobeno velmi vysokými nároky na použité materiály spojené s vysokou provozní teplotou pohybující se kolem 800  $^{\circ}\text{C}$ . Díky této teplotě je rovněž velmi omezená flexibilita provozu v porovnání s PEM elektrolýzéry. Naopak vysoká teplota má pozitivní vliv na účinnost konverze a odpadá potřeba použití nákladných katalyzátorů. [41]

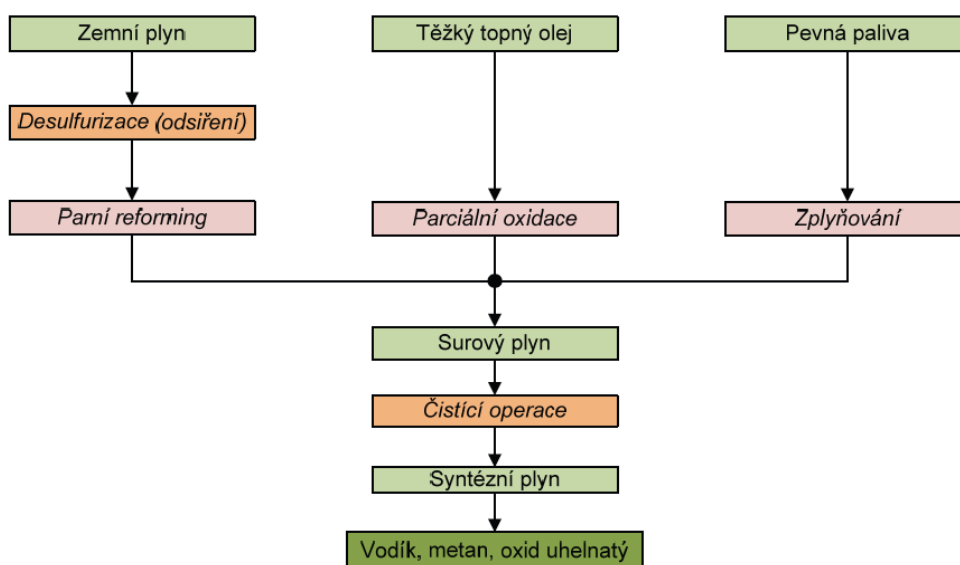
Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolýzérů (SOEC) jsou reverzní k reakci probíhající ve vysokoteplotních palivových článcích SOFC, jejichž princip bude popsán později. Na rozdíl od vysokoteplotní elektrolýzy jsou vysokoteplotní palivové články SOFC již několik let komerčně testovány. To je dané tím, že elektrolýza je obecně výrazně náročnější na materiál než palivové články, jelikož jde opačným potenciálovým směrem. Elektrolýzéry SOEC mají výhodu v tom, že je lze používat i v režimu SOFC – čili k výrobě elektrické energie. U nízkoteplotních článků toto není zatím možné. [41]

Elektrolýzér SOEC obsahuje pevný elektrolyt na bázi keramiky ve formě membrány. Musí plnit dvě funkce: zajistit iontový kontakt a zároveň zabezpečit separaci plynů vznikajících na elektrodách. Jako materiál je téměř výhradně využíváno ytrem stabilizované zirkonium (YSZ), jež má kromě nízké ceny také dobrou iontovou vodivost a mechanickou stabilitu. Pro katodu se používá nejčastěji materiál na bázi niklu. Materiálová náročnost na anodu je daleko větší, jelikož je vystavena silně oxidačnímu prostředí v čisté kyslíkové atmosféře. Používají se elektronově a současně iontově

vodivé směsné oxidy jako například oxidy manganu s příměsí lanthanu (LSM). Vysokoteplotní elektrolyzéry SOEC špatně snášejí časté změny teplot, a proto je u nich životnost co do počtu cyklů mnohem nižší než u alkalických a PEM elektrolyzérů. Produkovaná čistota vodíku je 99,9 %, účinnost v laboratorních podmínkách dosahuje 85 % a životnost se v současnosti pohybuje zhruba kolem 1000 hodin. [41] [42]

## 2.2 Výroba vodíku z fosilních paliv

Způsoby výroby vodíku z fosilních paliv jsou vzhledem k jejich vyčerpatelnosti trvale neudržitelné. Navíc produkují skleníkové plyny a tím negují jednu z hlavních výhod vodíku jako čistého zdroje energie. Přesto se v současnosti jedná o nejčastější způsob výroby.



Obr. 4 Zjednodušené schéma základních metod výroby vodíku z fosilních paliv [1]

### 2.2.1 Parní reforming (SMR)

Momentálně se jedná o nejrozšířenější a o jeden z nejlevnějších způsobů výroby vodíku. Surovinou pro parní reformování jsou lehké uhlovodíky. Nejčastěji se využívá zemní plyn, v menší míře pak nafta či zkapalněný ropný plyn a další. Tento proces vykazuje vyšší emise CO<sub>2</sub> oproti parciální oxidaci nebo zplyňování. Proces má dvě fáze. V první se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry (500–950 °C, 0,3–2,5 MPa) přivádí metan. Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a určitého množství oxidu uhličitého. Reakce probíhá za výše uvedených teplot a tlaků v reformeru. Poté následuje navyšování množství produkovaného vodíku shift reakcí CO z reformeru a další přídáním párou. Reakce probíhá již za nižších teplot.

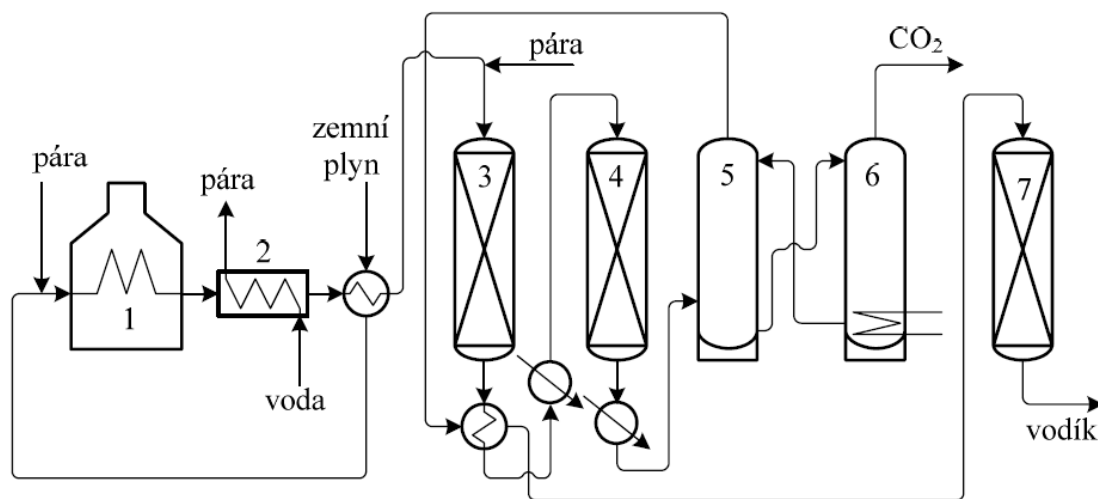
Reformní reakce:



Shift reakce:



Nevýhodou této technologie je, že pokud výrobní surovina obsahuje sloučeniny síry, musí se na začátku celého procesu odsířovat. [1] [16] [17]



(1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO<sub>2</sub>, 6 - desorbér CO<sub>2</sub>, 7 - metanizér)

Obr. 5 Schéma parního reformování zemního plynu [18]

### 2.2.2 Parciální oxidace (POX)

Parciální (částečná) oxidace je metoda, kterou lze použít jak pro plynné, tak kapalné suroviny z primárního i sekundárního zpracování ropy. Nejčastěji se však zplyňují těžké ropné zbytky např. těžký olej. Surovina se zplyňuje kyslíkem a vodní párou při teplotách 1300–1500 °C a tlacích 3–8 MPa. Výhodou tohoto nekatalytického procesu je to, že můžeme zpracovávat suroviny, které nelze odpařit. Dochází k celkové destrukci C-C vazeb, proto jediným uhlovodíkem, který zůstává v reakční směsi je metan a surovina může obsahovat velké množství sirných sloučenin a nemusí se odsířovat jako u parního reformingu. Velkou nevýhodou je potřeba mít kyslík o vysoké čistotě. [18]

### 2.2.3 Zplyňování pevných fosilních paliv

Z pevných fosilních paliv jako je například uhlí a koks, lze také vyrábět vodík. Tento proces se nazývá zplyňování. Základem procesu je reakce rozžhaveného uhlí, vodní páry a vzduchu. Díky teplotám někdy dosahujícím až 1200 °C, dojde ke vzniku směsi vodíku, dusíku, CO, CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>. Nevýhodou je fakt, že se jedná o poměrně energeticky náročné procesy, jelikož významná část vstupujícího uhlí je využita na udržení provozní teploty. [1]

## 2.3 Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů a elektrické energie

Hlavní výhody vodíku jako čistého a trvale udržitelného paliva se projeví v případě, že je produkován z obnovitelných zdrojů. Bohužel v současnosti podíl takto vyrobeného vodíku představuje jen zlomek celkové celosvětové produkce. Stojí za tím především nízká hustota energie obnovitelných zdrojů a díky tomu i zatím vysoká cena takto vyrobeného vodíku. Do této kategorie můžeme zařadit i

výrobu vodíku pomocí elektrolýzy, pokud je elektrická energie pro tento proces dodávána z obnovitelných zdrojů.

### **2.3.1 Výroba vodíku z biomasy**

Vodík obsažený v biomase představuje přibližně 6 % hmotnosti. Současné technologické možnosti výroby vodíku z biomasy zahrnují zplyňování, pyrolýzu, konverzi na kapalná paliva superkritickou extrakcí, zkapalňování, hydrolýzu a biologické postupy. Pro zplyňování a pyrolýzu je vhodná biomasa z dřevařského průmyslu (piliny, hobliny), zemědělské odpady (sláma, zrno) a odpad lesního hospodářství (kůra, probírkové dřevo). Biomasa je zplyňována kyslíkem a vodní párou za teplot 800 °C až 1200 °C. Pro biologické procesy je vhodná biomasa z odpadní vody, kravský hnůj, exkrementy z užitkových zvířat nebo potravinářské odpady apod. Biologické procesy obvykle pracují s různými druhy anaerobních bakterií či řas. Působením mikroorganismů se od sebe liší typem substrátu a procesními podmínkami. [15]

### **2.3.2 Termochemické cykly**

Tento princip je znám z přelomu 70. a 80. let minulého století, kdy byl předmětem intenzivního výzkumu v době ropné krize. Princip je založen na procesu termochemického štěpení vody, kdy je voda rozdělena na vodík a kyslík pomocí série chemických reakcí. Tyto reakce jsou iniciované teplem, případně teplem a elektrickou energií u hybridních cyklů. Jedná se o uzavřené cykly, kdy použité chemické látky jsou recyklovány a vstupují znovu do výrobního procesu. Doplněnou vstupní surovinou je tak pouze voda. [14]

### **2.3.3 Ostatní způsoby výroby**

Dalších možných způsobů jak vyrobit vodík je celá řada, avšak většinou nejsou v současnosti využívány ve větším měřítku. V budoucnu by se vodík mohl vyrábět termochemickou cestou v jaderných reaktorech IV. generace. Výstavba těchto reaktorů se však předpokládá nejdříve po roce 2030. Z dalších nových technologií je možno zmínit fotoelektrolýzu, kde je využíváno sluneční světlo k přímému rozkladu vody na vodík a kyslík. Zajímavý způsob výroby vodíku v menším měřítku je za pomoci mikroorganismů. Vodík je pak vyráběn v mikrobiálním elektrolytickém článku, kde dochází k rozkladu biologického materiálu za pomoci elektřiny a mikroorganismů. Účinnost této technologie je sice nízká, ale mohla by v budoucnu zabezpečit energeticky chod čističek odpadních vod. [14] [15] [16]

### 3. Skladování vodíku

Pro budoucnost vodíkových technologií je vedle výroby vodíku klíčové jeho bezpečné, energeticky efektivní a ekonomicky dostupné uskladnění. Ze všech paliv má vodík nejmenší hustotu a druhý nejnižší bod varu ze všech látek, navíc v širokém rozsahu koncentrací tvoří se vzduchem hořlavou a výbušnou směs. Tyto vlastnosti značně komplikují jeho skladování a zvyšují bezpečnostní požadavky. Vodík lze skladovat jak v plynném, tak i kapalném skupenství. Skladování v plynné formě vyžaduje velký objem zásobníků a vysoké tlaky, v kapalné formě pak kryogenní systém skladování. Dle pokročilosti výzkumu a vývoje můžeme technologie pro skladování vodíku rozdělit na konvenční a alternativní. Mezi konvenční technologie patří především skladování stlačeného vodíku v tlakových nádobách nebo kapalného vodíku v kryogenních nádobách. Do alternativních technologií můžeme zařadit skladování vodíku v hydridech kovů a alkalických zemin, v nanostrukturách uhlíku nebo jako součást chemických sloučenin. [13] [19]

#### 3.1 Konvenční technologie uskladnění

Konvenční způsoby skladování vodíku jsou bezpečné a dlouhodobě ověřené systémy, ale již nelze předpokládat výrazná technologická vylepšení. V současnosti nejpoužívanější variantou je skladování plynného vodíku v bateriových zásobnících. Pro větší skladovací množství je využíváno skladování v kapalném skupenství. [6] [19]

##### 3.1.1 Skladování vodíku v plynné fázi

Pro statické aplikace se nejčastěji používá ocelových tlakových lahví válcového tvaru z nízkouhlíkaté nebo legované oceli bez použití svaru nejčastěji o 50 l vodního objemu pro běžné aplikace. Při potřebě většího množství vodíku se využívá bateriového uspořádání tvořeného dvanácti lahvemi. Je-li vyžadováno ještě větší množství vodíku, využívá se stacionárních velkokapacitních zásobníků, což jsou velké válcové vysokotlakové nádoby. V mobilních aplikacích se pak užívá kompozitních tlakových nádob o objemech od desítek litrů až do 300 l vodního objemu. Typickým provozním tlakem je 35 MPa, v novějších aplikacích se využívá tlaků 45 až 70 MPa. Vnitřní povrch kompozitních lahví je pokryt tenkou vrstvou kovů či speciálního polymeru, který slouží k zabránění úniku stlačeného vodíku přes strukturu kompozitu. Další možností uskladnění plynného vodíku je uložení do podzemních úložišť, jako jsou vytěžené solné doly nebo místa, kde byl těžen či skladován zemní plyn. [1] [6] [19]

##### 3.1.2 Skladování vodíku v kapalné fázi

Vodík má bod varu přibližně  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  a s tím souvisejí vysoké energetické nároky na zkapalnění a použité materiály pro skladování, které musí tuto nízkou teplotu udržovat. Kapalná forma má však výhody v tom, že se dá relativně jednoduše transportovat a používat. Proces zkapalňování lze zjednodušeně popsat v následujících krocích:

1. Komprese vodíku v pístovém kompresoru, předchlazení stlačeného plynu na teplotu zkapalnění dusíku ( $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
2. Expanze přes turbínu
3. Katalytická konverze na stabilní formu vodíku

Energie potřebná ke zkapalnění se pohybuje přibližně kolem 40 % energie v palivu. Pro uskladnění je nutno použít vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s přetlakem 5 barů. Vzhledem k tomu, že při skladování kapalného vodíku dochází vlivem přestupu tepla k postupnému odpařování a zvyšování tlaku uvnitř nádoby, musí být tyto nádoby vybaveny přetlakovým mechanismem k odpouštění odpařeného vodíku. [13] [19]

## **3.2 Alternativní technologie uskladnění**

Alternativní technologie nejčastěji využívají skladování vodíku ve formě sloučenin nebo uvnitř struktur a na povrchu vhodných materiálů. Technologie patřící do této kategorie jsou stále předmětem výzkumu a vývoje a jejich komerční nasazení ve větším měřítku se dá teprve očekávat.

### **3.2.1 Metalhydridy a hydridy alkalických zemin**

Tato technologie skladování je založena na principu snadné absorpce plynu vhodnými materiály na bázi kovů, za vysokého tlaku a mírných teplot. Tyto látky pak uvolňují vodík jako plyn v případě, kdy jsou zahřívány při nízkých tlacích a relativně vysokých teplotách. Výhodou této technologie skladování je fakt, že vodík se stává součástí chemické struktury kovů, a proto není požadován vysoký tlak nebo kryogenní teplota. Jedná se o nejbezpečnější systém skladování vodíku, protože vodík je uvolňován z hydridů pro použití při nízkém tlaku. Nevýhodou je naopak nízká hustota energie, jelikož i ty nejvhodnější metalhydridy obsahují jen 8 % hmotnosti vodíku. Typickým provedením je výroba ve formě granulované, zrnité či práškové struktury, tak aby měla co největší plochu pro kontakt s plynem. Kromě metalhydridů se využívá i hydridů alkalických zemin. To jsou variace hydridů, které mají lepší vlastnosti oproti metalhydridům. Týkají se paletizovaných sodíkových, draslíkových a litných komponent. Není zde potřeba dodávání tepelné energie, jelikož komponenty hydridů reagují s vodou za vývinu vodíku. [13]

### **3.2.2 Ostatní metody skladování**

Další možností uskladnění je v uhlíkatých nanostrukturách. Mezi uhlíkaté nanostruktury řadíme vysokoporézní grafit a uhlíkaté nanotrubice. Avšak dle dosavadních výzkumů dosahují uhlíkaté nanotrubice pro vodík maximální hmotnostní kapacitu jen kolem 7 %, a to navíc za velmi krajních podmínek (80 K, 7 MPa). Pro dlouhodobější uskladnění se jeví jako vhodnější převést vodík na některou snadněji zkapalnitelnou sloučeninu jako například metan, amoniak nebo využití směsi vodíku a zemního plynu a jeho následné uložení v podzemních zásobnících. [1] [20]



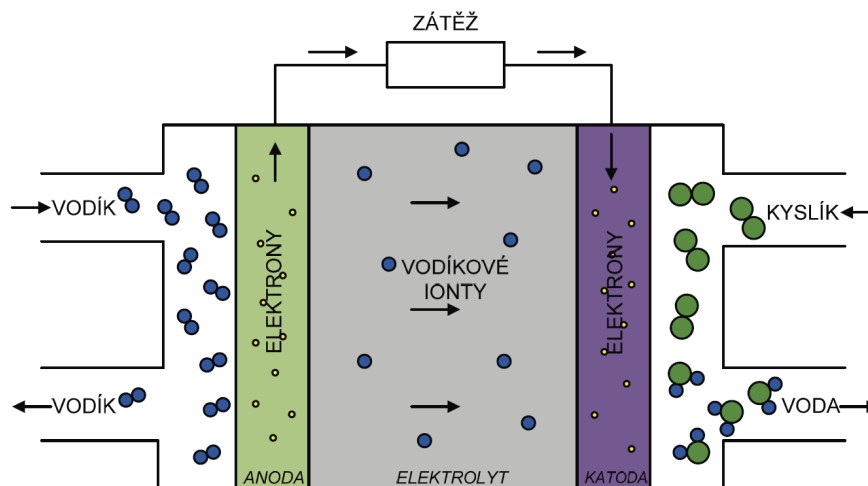
## 4. Přeměna vodíku na elektrickou energii v palivových článcích

Vodík je principiálně možné využít dvěma způsoby. Chemickou energii, která je v něm uchována, je možno přeměnit na jiný typ (tepelnou, mechanickou) a to buď ve spalovacím motoru či turbíně a až poté ji přeměnit na elektrickou, nebo jí přímo přeměnit na elektrickou energii v palivových článcích. Palivové články se řadí mezi elektrochemické zdroje energie, v nichž dochází k přímé přeměně chemické energie paliva (např. vodíku) na energii elektrickou. V tomto směru se tedy podobají článkům primárním či sekundárním (bateriím a akumulátorům). Zásadním rozdílem je ovšem to, že aktivní chemické látky v případě palivových článků nejsou součástí anody a katody, ale jsou k nim průběžně přiváděny zvnějšku. Elektrody slouží výlučně jako katalyzátor chemických přeměn, během činnosti článku se téměř neopotřebovávají a jejich chemické složení se nemění. Při stabilním přívodu aktivní látky může tedy teoreticky pracovat libovolně dlouhou dobu. [6]

Jelikož napětí jednoho článku je přibližně jen 1,1 V, proto z důvodu zvýšení jmenovitého elektrického napětí a výkonu se články spojují do větších celků o desítkách, stovkách až tisících. V principu neexistuje žádné omezení pro maximální počet elementárních článků v celkovém souboru. Díky tomu lze konstruovat jednotky v širokém rozmezí výkonů od wattů až po megawatty. [21]

### 4.1 Princip palivového článku

Princip palivového článku je velmi jednoduchý a obecná konstrukce různých typů článku je podobná. Jednotlivé typy se pak liší použitým materiálem elektrod, elektrolytem, pracovní teplotou či konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. Princip funkce palivového článku je děj v principu inverzní k elektrolyze a je zobrazen na Obr. 6. [21]



Obr. 6 Princip palivového článku PEM [1]

Na zápornou elektrodu (anodu), které říkáme palivová, se přivádí aktivní látka - nejčastěji vodík, která zde oxiduje za vzniku iontů  $H^+$  a elektronů  $e^-$ . Elektrony, které jsou jímány anodou, pak představují stejnosměrný elektrický proud a vnějším obvodem se pohybují ke kladné elektrodě (katodě). Naproti tomu ionty  $H^+$  putují od anody elektrolytem ke katodě. Na katodu se přivádí okysličovadlo - nejčastěji kyslík ze vzduchu a probíhá zde redukce. Kyslík reaguje společně s ionty  $H^+$  a elektrony  $e^-$  za vzniku vody  $H_2O$ , která je z palivového článku odváděna. Pokud se vnější obvod

přeruší, probíhající chemické reakce se okamžitě zastaví vlivem deficitu elektronů. Palivem nemusí být jen výše zmiňovaný vodík, ale mohou to být látky plynné, kapalné i tuhé jako například oxid uhličitý CO, hydrazin N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, metanol CH<sub>3</sub>OH, sodík Na, hořčík Mg a další. Okysličovadlem mohou být taktéž látky plynné (kyslík O<sub>2</sub>, chlor Cl<sub>2</sub>), kapalné či tuhé. [1] [6]

Na elektrodách se shromažďují elektrony a nesou elektrický proud, a proto jsou na ně kladeny určité kvalitativní požadavky. Mezi tyto požadavky patří dobrá elektrická vodivost, chemická stabilita, dobré katalytické vlastnosti, které usnadňují reakce a taktéž dobré mechanické vlastnosti z důvodu tepelného namáhání. Aby palivo či oxidant mohl projít až k elektrolytu, musí mít elektrody vysokou poréznost. Toho je dosaženo tím, že elektroda se skládá z drobných zrn vhodného kovu nebo uhlíku. Na těchto zrnech je zejména u článků s nižší pracovní teplotou nanесena vrstva vhodného katalyzátoru, která slouží k urychlení chemické reakce. Díky přímé přeměně chemické energie na elektrickou mají palivové články relativně vysokou teoretickou účinnost pohybující se mezi 40 až 60 %. [1] [6] [22]

## 4.2 Typy a rozdělení palivových článků

Palivové články se liší především druhem použitého elektrolytu a provozní teplotou. Tím je dáno jejich základní rozdělení. Rozdělení a technické parametry jednotlivých typů palivových článků je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 Srovnání různých typů palivových článků [13]

Rozdělení	Typ PČ	Druh elektrolytu	Provozní teplota (°C)	Napětí naprázdno (V DC)	Použitá paliva
Nízkoteplotní	AFC	Hydroxid draselný (KOH)	65–220	1,1–1,2	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
	PEMFC	Proton Exchange Membrane (Nafion, Gore)	50–120	1,1	H <sub>2</sub> /metanol + O <sub>2</sub> /vzduch
	DMFC	Proton Exchange Membrane (Nafion, Gore)	130	1,1	Metanol/ethanol + O <sub>2</sub> /vzduch
	PAFC	Kyselina fosforečná	150–210	1,1	H <sub>2</sub> /plyn bohatý na vodík + vzduch
Vysokoteplotní	MCFC	Vysokoteplotní sloučenina uhlíkových solí CO <sub>3</sub> (Sodík, Hořčík)	600–700	0,7–1,0	H <sub>2</sub> /plyn bohatý na vodík/CO + vzduch
	SOFC	Sloučeniny pevných keramik (Vápník, Zirkonium)	650–1000	0,8–1,0	H <sub>2</sub> /plyn bohatý na vodík/CO + vzduch

### Nízkoteplotní palivové články

Pracovní teplota těchto článků se pohybuje obvykle do 250 °C. Tyto nízké teploty neumožňují vnitřní reforming paliva a vyžadují tedy vnější zdroj vodíku. Výhodou je rychlý rozběh, menší poruchovost konstrukčních materiálů. Díky těmto vlastnostem se hodí spíše pro mobilní aplikace.

## Vysokoteplotní palivové články

Provozní teplota vysokoteplotních palivových článků (VPČ) se pohybuje nad 600 °C. Doposud byly vyvinuty dva základní typy lišící se použitým elektrolytem. Vysokoteplotní palivové články umožňují využití vysoko-potenciálního tepla výstupních plynů např. k ohřevům, endotermním reakcím (zplyňování, reformování), popřípadě v parních a plynových cyklech pro výrobu elektrické energie. VPČ mají vysokou celkovou teoretickou účinnost, a to díky kombinaci VPČ, využití odpadního tepla a nespotřebovaných paliv v tepelných motorech. VPČ mají oproti nízkoteplotním palivovým článkům velkou výhodu v tom, že jako palivo lze využívat nejen čistý vodík, ale také oxid uhelnatý, různé směsi vodíku s CO a dokonce také metan. Nevýhodou je vysoká citlivost na obsah prachu, sloučenin síry a par těžkých a alkalických kovů v palivu. [23] [24]

### 4.2.1 Alkalické palivové články (AFC)

Jedná se o jeden z nejstarších typů palivového článku. Byly používány např. v kosmických lodích v rámci programu kosmických letů Gemini, Apollo a Space Shuttle. Velkou výhodou je poměrně vysoká účinnost, která dosahuje při použití čistého vodíku přibližně 60 %. Nevýhodou je vysoká cena, ve které se projevuje přítomnost platiny či jiných katalyzátorů ze vzácných kovů na elektrodách. Jako elektrolyt je obvykle používán vodní roztok roztavené alkalické směsi hydroxidu draselného (KOH). Pro články pracující s teplotou kolem 260 °C je elektrolytem 85% KOH, pro teploty do 120 °C pak 35–50% KOH. KOH má oproti ostatním alkalickým hydroxidům tu výhodu, že má vysokou iontovou vodivost. Jako katalyzátory se používají např. platina, nikl, stříbro. Následující chemické rovnice popisují procesy probíhající na jednotlivých elektrodách. [1] [6] [13]

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Souhrnná rovnice:



Problémem je reakce KOH se vzdušným oxidem uhličitým CO<sub>2</sub> za vzniku uhličitanu draselného K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Ten postupně způsobuje degradaci vlastností elektrolytu a také dochází k postupnému zanášení pórů elektrod. Proto je jako okysličovadlo nutné použít čistý kyslík nebo vzduch, ze kterého se odstraní CO<sub>2</sub>. [6]

Výhody alkalických palivových článků

- Nízká provozní teplota a díky tomu rychlá doba náběhu a relativně jednoduchý provoz
- Vysoká účinnost
- Malé rozměry a hmotnost
- Malé množství platinového katalyzátoru
- Malá koroze konstrukčních materiálů

Nevýhody alkalických palivových článků

- Problém reakce KOH s oxidem uhličitým, nutné použít čistý kyslík nebo vzduch zbavený CO<sub>2</sub>
- Relativně krátká životnost

- Složitý systém vodního hospodářství
- Tekutý elektrolyt – horší manipulace se články

#### 4.2.2 Palivové články s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC)

Tyto palivové články se vyznačují vysokou proudovou vodivostí, konstrukcí s nízkou hmotností a malými rozměry. Díky tomu a také nízké pracovní teplotě, která se obvykle pohybuje do 100 °C, je tento typ palivového článku vhodný pro mobilní aplikace. Jde o články, kde elektrolytem je tenká polymerová membrána, která působí jako elektronový izolátor a zároveň jako velmi dobrý vodič vodíkových kationtů (protonů). Použitým materiálem jsou nejčastěji sulfonované fluoropolymery, obvykle Nafion. Protony přes membránu mohou volně migrovat a ztráty v důsledku vnitřního odporu elektrolytu jsou zanedbatelné. Při provozu musí být membrána hydratována, aby se zajistila její vodivost. Elektrody jsou potažené tenkou vrstvou katalyzátoru, obvykle platiny. Platina je dostatečně reaktivní při vázání se na vodíkové a kyslíkové meziprodukty, jak je požadováno pro elektrochemický proces na elektrodách. Zároveň také účinně uvolňuje meziprodukty při tvorbě výsledné sloučeniny. Chemické procesy probíhající na jednotlivých elektrodách jsou následující: [6] [13] [22]

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Celková reakce:



Elektrody a elektrolytická membrána jsou za tepla a pod tlakem slisovány do jednoho celku, který má tloušťku menší než 1 mm. Palivové články PEMFC pracují obvykle s teplotami v rozmezí 50 až 100 °C a tlaky 1 až 2 bary. Provozní teplota ale může být až 200 °C, avšak provoz při teplotách nad 100 °C je možný pouze při vyšších tlacích, jelikož je nutný požadavek kapalné vody. [1] [13]

Výhody PEMFC palivových článků

- Relativně dobře snášejí větší podíl oxidu uhličitého v palivu i v okysličovadlu, lze použít vzduch jako okysličovadlo a reformátor jako palivo
- Nízké provozní teploty a tím rychlý start článku a jeho bezpečnost
- Použití pevného elektrolytu, což zvyšuje životnost článku
- Velká proudová a energetická hustota, relativně vysoké výstupní napětí
- Pracují při malých tlacích 1 až 2 bary
- Kompaktní rozměry, mechanická odolnost, konstrukční jednoduchost

Nevýhody PEMFC palivových článků

- Citlivé na oxid uhelnatý v palivu (maximálně 50ppm)
- Použití vody pro zvlhčování plynů, což limituje provozní teplotu článku pod bod varu
- Používají se drahé platinové katalyzátory a membrány

#### 4.2.3 Palivové články s přímým zpracováním metanolu (DMFC)

Jedná se o speciální typ nízkoteplotního palivového článku s pevným polymerním elektrolytem, kde se jako palivo využívá metanol. Metanol má oproti vodíku několik výhod. Lze jej snadno získávat ze zemního plynu nebo biomasy, je levnější a je vyvinutá infrastruktura bezpečného skladování a transportu. Pracovní teplota článku se pohybuje v rozmezí 60 až 120 °C. Hlavní oblastí použití jsou mobilní aplikace, například pohon vysokozdvížných vozíků. V budoucnu lze očekávat další rozvoj této technologie především v miniaturních aplikacích jako napájení notebooků, satelitních telefonů apod. [1] [13]

#### 4.2.4 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Tyto články se vyrábějí již více než 30 let a jejich technologie výroby je velmi dobře zvládnutá. Účinnost výroby elektrické energie je ale oproti ostatním typům nižší, přibližně 36 až 42 %. Jako elektrolyt se používá kyselina fosforečná  $H_3PO_4$ , která je obsažena v matrici z karbidu křemíku. Obě elektrody jsou tenké destičky z pórovitého uhlíku opatřené tenkou vrstvou platiny, která slouží jako katalyzátor. Pracovní teplota se pohybuje od 150 do 210 °C. Díky těmto teplotám jsou články vhodné pro instalaci s kogeneračními jednotkami k zužitkování odpadního tepla a celková účinnost kombinované výroby energie se pak pohybuje i přes 80 %. U PAFC článků reaguje kyslík s vodíkem a můžeme ji popsat následovně: [1] [6] [13]

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Celková reakce:



Výhody PAFC palivových článků

- Obsah oxidu uhličitého v palivu může být až 30 %, jako okysličovadlo lze použít vzduch
- Odpadní teplo lze využít v kogeneračních aplikacích, přesto pracují při relativně nízké teplotě
- Vysoká tepelná, chemická a elektrochemická stabilita

Nevýhody PAFC palivových článků

- Velká citlivost na obsah oxidu uhelnatého a sloučenin síry v palivu
- Elektrolyt má korozivní účinky
- Produktová voda vstupuje do elektrolytu a ředí jej
- Větší rozměry a hmotnost
- Delší doba náběhu v porovnání s AFC a PEMFC, nutnost zahřátí před uvedením do provozu

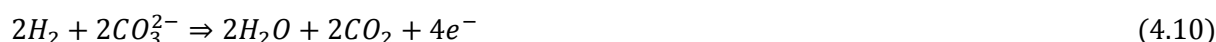
#### 4.2.5 Palivové články s elektrolytem na bázi roztavených uhličitánů (MCFC)

Elektrolyt je v tomto typu článku tvořen roztavenou směsí alkalických uhličitánů, obvykle se jedná o binární směs uhličitánů lithia a draslíku nebo lithia a sodíku. Za teplot 600–700 °C tvoří roztavené uhličitany vysoce vodivou taveninu, která je držena v keramické matrici na bázi  $LiAlO_2$ . V

důsledku vysokých provozních teplot je kinetika elektrodových reakcí velice rychlá a není nutné využívat drahé kovy jako katalyzátory. Elektrody musí být schopny pracovat ve velmi agresivním a teplém prostředí vyvolávajícím korozi. Anoda je vysoce porézní a je obvykle tvořena slitinami niklu, katoda pak jeho oxidy.

Zvláštností oproti jiným palivovým článkům je nutnost přivádět  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$  na katodu, na které elektrochemickou reakcí vznikají ionty  $\text{CO}_3^{2-}$ . Tyto ionty se pohybují kapalným elektrolytem k anodě, kde reagují např. s vodíkem za vzniku  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  a elektronů. Elektrony se po průchodu vnějším obvodem opět spotřebovávají na katodě, při reakci  $\text{CO}_2$  a kyslíkem. Reakce probíhající na anodě a katodě lze popsat pomocí chemických rovnic: [6] [23]

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Výhody MCFC palivových článků

- Vysoká účinnost přeměny na elektrickou energii
- Vysoko-potenciální odpadní teplo
- Není potřeba využívat drahé kovy jako katalyzátor
- Samovolný vnitřní reforming lehkých uhlovodíků

Nevýhody MCFC palivových článků

- Vysoké nároky na použitý materiál díky vysoké pracovní teplotě a korozivnímu prostředí
- Vysoká citlivost na obsah síry v palivu
- Dlouhá doba náběhu
- Použití tekutého elektrolytu komplikuje manipulaci za chodu

Z výše uvedených výhod a nevýhod lze vyvodit, že palivové články typu MCFC se hodí především pro stacionární aplikace jako například záložní zdroje elektrické energie, které nahrazují klasické kogenerační jednotky se spalovacím motorem. [23]

#### 4.2.6 Palivové články s elektrolytem na bázi pevných oxidů (SOFC)

Palivové články SOFC jsou výjimečné tím, že jejich elektrolyt je pevný, neporézní oxid kovu. V současnosti se obvykle používá oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ ) stabilizovaný oxidem yttritým ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Skutečnost, že elektrolyt je pevný, značně zjednodušuje celý systém, jelikož se zde vyskytuje pouze plynná a pevná fáze. Jejich pracovní teplota je 600–1000 °C, což umožňuje rozštěpení molekuly kyslíku a následné vedení kyslíkatých aniontů bez přítomnosti platinového katalyzátoru. Konstrukci článku tvoří dvě porézní elektrody, mezi nimiž je elektrolyt. Vzduch je veden podél katody, na které dochází za přítomnosti elektronu k rozštěpení molekuly kyslíku na ionty. Oxidové anionty prochází elektrolytem směrem k anodě, kde na rozhraní elektrolytu a anody reagují s palivem za vzniku vody, oxidu uhličitého (dle paliva), tepla a zároveň se uvolňují elektrony. Elektrony procházejí vnějším obvodem, kde konají elektrickou práci. [14] [23]

Reakce probíhající v palivovém článku při použití vodíku jako paliva:

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Jako palivo lze u článků SOFC použít široké spektrum uhlovodíkových paliv. Díky vysoké pracovní teplotě je s vysokou účinností umožněna přímá přeměna  $H_2$  a CO na elektrickou energii. Další uhlovodíková paliva prochází před vstupem na anodu vnitřním reformingem, kde se štěpí na  $H_2$  a CO. Odpadní vysoko-potenciální teplo lze využít v kogeneračních jednotkách či k sekundární výrobě elektrické energie. Články SOFC na rozdíl od článků MCFC relativně dobře snáší nečistoty v palivu a může se lišit především v závislosti na designu elektrod a mikrostruktur. [23]

Výhody SOFC palivových článků

- Samovolný vnitřní reforming uhlovodíkových paliv
- Produkují vysoko-potenciální odpadní teplo
- Vykazují vysokou účinnost
- Není třeba používat drahých kovů jako katalyzátor
- Mají pevný elektrolyt
- Nejsou tak citlivé na přítomnost síry v palivu jako MCFC články

Nevýhody SOFC článků

- Velké nároky na použitý materiál
- Dlouhá doba náběhu článku
- V současnosti stále krátká životnost článku

I když je tato technologie stále ve vývoji, pracuje ve světě v komerčním provozu již celá řada SOFC systémů, převážně stacionárních o výkonech až několik megawatt. Většímu rozšíření SOFC článků zatím brání jejich krátká životnost v komerčním provozu (do 10 000 hod.) a vysoký pokles účinnosti v závislosti na počtu provozních hodin. [23]

### 4.3 Výhody a nevýhody palivových článků

Výhody a nevýhody palivových článků lze posuzovat především v porovnání se současnými klasickými zdroji elektrické energie. Mezi hlavní výhody a nevýhody PČ patří:

Výhody palivových článků

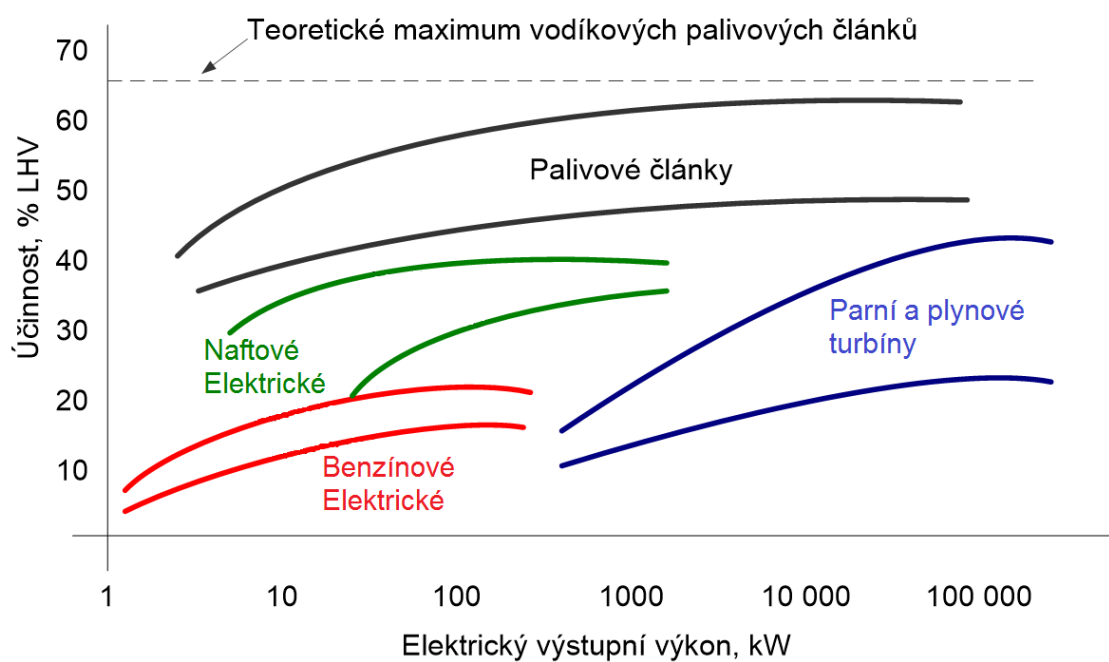
- Pracují téměř bez škodlivých emisí
- Nepřítomnosti pohyblivých částí a z toho vyplývající tichý chod, nízká poruchovost a vysoká životnost (až desítky tisíc hodin)
- Vysoká účinnost přeměny energie v důsledku přímé přeměny chemické energie paliva na elektrickou (možnost zvýšení účinnosti díky využití odpadního tepla v kogenerační jednotce)
- Modulární koncepce

Nevýhody palivových článků

- Citlivost na některé příměsi paliva nebo okysličovadla - potřeba úpravy paliva
- Nutnost kontinuálně odstraňovat zplodiny chemických reakcí

- U vysokoteplotních článků relativně dlouhá startovací doba
- Nedostatečná infrastruktura a náročnost skladování vodíku jako paliva
- Potřeba udržovat optimální pracovní teplotu a tlak aktivních médií

Srovnání účinnosti palivového článku s jinými systémy výroby elektrické energie je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7 Účinnost jednotlivých systému při výrobě elektrické energie [13]

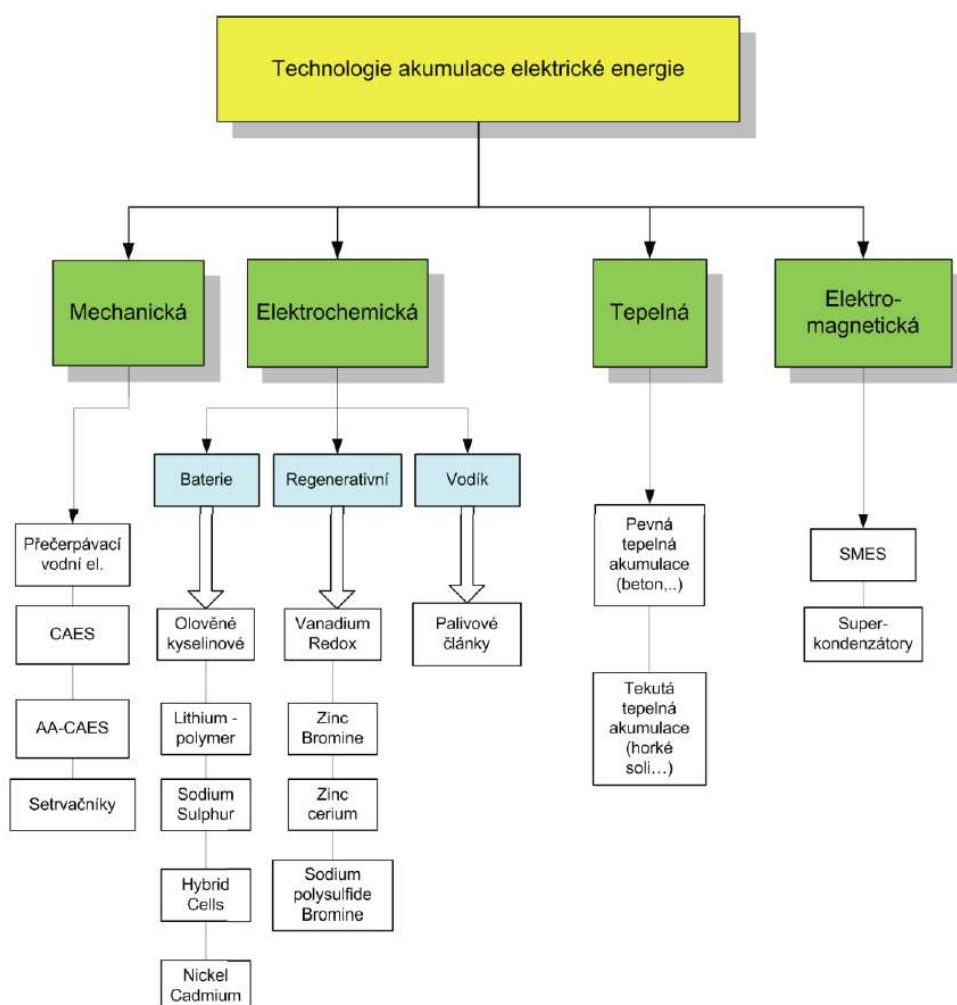


## 5. Vodíkové technologie v porovnání s jinými systémy akumulace elektřiny

Vodík jako nosič energie představuje jedno z možných řešení pro energetiku v blízké i vzdálené budoucnosti. Vodíkové technologie mají potenciál stát se minimálně alternativou k současným možnostem akumulace elektrické energie. V následujícím textu budou rozebrány současné možnosti akumulace elektrické energie a porovnány s vodíkovými technologiemi v systému akumulace elektrické energie.

### 5.1 Systémy akumulace elektrické energie

Akumulace elektrické energie je její hromadění a uskladnění v určité formě pro její pozdější využití v dané kvalitě a kvantitě. Elektrina je dosti komplikovaná komodita a je obtížné udržet vyrovnanou okamžitou nabídku a poptávku. Nicméně existují možnosti, jak elektřinu v době nadbytku výroby skladovat a v době nedostatku ji zpět použít. Jednotlivé možnosti ukládání elektrické energie podle použité technologie, jež budou dále probrány, znázorňuje následující blokový diagram. [1] [2]



Obr. 8 Technologie akumulace elektrické energie [7]

Význam akumulace elektrické energie získá ještě více na významu, pokud se zamyslíme do budoucna nad trvale udržitelnou výrobou elektrické energie, kde budou důležitou úlohu hrát obnovitelné zdroje jako například větrné a solární elektrárny. Ty sice produkují čistou energii, ale jejich velkým problémem je časově proměnný výkon závislý na faktorech, které nedokážeme ovlivnit. Bude potřeba budovat nová technická zařízení pro uskladnění elektrické energie v daleko větším měřítku než je v současnosti. Proto se akumulátory neboli skladiště energie stále vyvíjejí a hledají se nové a účinnější způsoby uskladnění.

Princip akumulace spočívá v přeměně elektrické energie na jinou formu energie, ve které je následně uskladněna a podle potřeby zpět převedena na energii elektrickou. Jednotlivé způsoby akumulace se liší především velikostí výkonů, při kterých akumulační systémy fungují, účinností, životností nebo dobou, po kterou ji jsme schopni skladovat s přijatelnými ztrátami apod. Asi nejčastěji se v běžném životě setkáváme s energií akumulovanou v elektrochemické formě v klasických akumulátorových bateriích. Takto však nelze akumulovat větší množství energie. Pro akumulaci energie ve větším měřítku máme nyní prakticky jen jednu možnost a to jsou přečerpávací vodní elektrárny, které mají však některé nevýhody a například pro dlouhodobé skladování nejsou příliš vhodné. V následujícím textu budou stručně popsány některé z možností, jak lze energii skladovat.

### 5.1.1 Mechanická akumulace

#### Přečerpávací vodní elektrárny

Jedná se o mechanickou akumulaci ve formě potenciální energie vody. V současnosti je to nejčastější způsob skladování elektrické energie ve větším měřítku. Přečerpávací elektrárna využívá výškového rozdílu hladin dvou nádrží, horní a dolní, které jsou vzájemně spojeny potrubím s reverzní turbínou, případně doplněné čerpadly. V době nadbytku výroby energie je možné čerpat vodu do horní nádrže. Tím voda zvyšuje svoji potenciální energii o

$$\Delta W_p = mg \cdot \Delta h \quad (5.1)$$

a v době nedostatku energie v rozvodné síti je voda z horní nádrže vypouštěna do dolní nádrže. Tím předá svou potenciální energii turbíně a s ní spojenému generátoru elektrické energie. [2]



Obr. 9 Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně [3]

Výhodou PVE je, že mohou najet do plného výkonu během relativně krátké doby, jsou nenáročné na obsluhu, mají dlouhou životnost a slušnou účinnost až kolem 80 %. Nevýhodou je pak složitost a omezený počet míst jejich výstavby. V České republice jsou v současné době v provozu tři PVE – Dlouhé Stráně, Dalešice a Štěchovice II, všechny jsou ve vlastnictví společnosti ČEZ a mají celkový instalovaný výkon 1175 MW. Nejvyšším instalovaným výkonem z nich disponuje PVE Dlouhé Stráně, která se nachází v pohoří Hrubého Jeseníku. Ta je vybavena dvěma reverzními Francisovými turbínami s celkovým výkonem 650 MW. Jedná se o největší soustrojí s reverzní turbínou v Evropě. [5]

Výhody PVE:

- Relativně rychlý start v řádech desítek sekund
- Dlouhá životnost minimálně 50 let
- Velká skladovací kapacita a výkon
- Jednoduchá obsluha a provoz

Nevýhody PVE:

- Finanční a technická náročnost výstavby
- Málo vhodných míst pro výstavbu

### **Akumulace do stlačeného vzduchu (CAES, AA-CAES)**

Jde o alternativu k PVE pro skladování většího množství energie. Avšak tento systém je zatím ve světě omezen jen na několik málo zařízení. Princip spočívá v tom, že při nadbytku elektrické energie v síti je turbokompresory vtlačén vzduch pod tlakem několik MPa do utěsněných podzemních prostor jako jsou například solné jeskyně, vytěžené doly apod. V době zvýšené potřeby výroby elektrické energie je stlačený vzduch přiváděn do spalovací komory, kde je spalován se zemním plynem. Následně je hnán na lopatky turbíny, která je spojena s generátorem elektrické energie. Doba náběhu je delší než u PVE a činí přibližně 10 minut. Účinnost systému se pohybuje mezi 60–75 %, a je především dána ztrátou tepelné energie při kompresi. Tento problém částečně řeší vylepšený systém AA-CAES. [1]

Výhody CAES:

- Relativně rychlý start
- Možnost akumulace většího množství energie na delší dobu
- Relativně velké výkony

Nevýhody CAES:

- Potřeba velkých podzemních prostor pro uložení stlačeného vzduchu

### **Setrvačníky**

Setrvačníky akumulují energii v podobě rotační kinetické energie. Tato energie je obvykle dodávána motorem, se kterým je setrvačník spojen a který v případě potřeby přejde do generátorového režimu. Velikost kinetické energie je dána rovnicí:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (5.2)$$

Z rovnice vyplývá, že velikost kinetické energie je závislá na druhé mocnině úhlové rychlosti. Proto k dosažení rozumné energetické hustoty jsou otáčky v řádu desítek tisíc za minutu. Moderní setrvačníky používají i magnetických ložisek a otáčí se za sníženého tlaku blízcímu se vakuu. Tím jsou minimalizovány ztráty a setrvačníky se vyznačují velmi dobrou účinností přes 90 %. Doba náběhu se pohybuje v jednotkách milisekund a životnost je vysoká, řádově  $10^5$  cyklů. Tento typ akumulace se vyznačuje vysokým výkonem po kratší dobu, tudíž se hodí například jako záložní zdroj pro překlenutí doby mezi výpadkem sítě a startem záložního dieselagregátu v místech, kde musí být zajištěna kontinuální dodávka elektrické energie, jako jsou například nemocnice nebo servery. [1]

Výhody setrvačnicků:

- Výkon až megawatty
- Velmi krátká doba náběhu
- Vysoká účinnost a životnost  $10^5$  cyklů

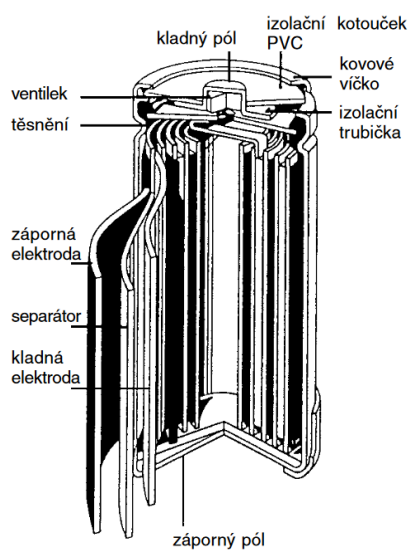
Nevýhody setrvačnicků:

- Malá akumulovaná energie
- Jen pro krátkodobé zálohování

### 5.1.2 Elektrochemická akumulace

#### Akumulátory

Jde o nejčastější formu skladování elektrické energie v malém měřítku a pro mobilní aplikace. Elektrická energie se akumuluje ve formě chemické energie v chemických nebo též elektrochemických článcích. Elektrická energie v těchto článcích pak vzniká přímou přeměnou chemicky aktivních materiálů, jde tudíž o přeměnu energií bez mezistupňů jiných forem (mechanické, tepelné), a proto je účinnost těchto článků dosti vysoká. Elektrochemický článek tvoří soustava prostorově oddělené kladné a záporné elektrody a iontově vodivý elektrolyt, jež je ve styku s oběma elektrodami. Elektrochemické články se podle principu dělí na primární, sekundární a palivové. [4]



Obr. 10 Konstrukce válcového Ni-MH článku [4]

Primární články nejsou vhodné pro akumulaci energie, jelikož chemická reakce v nich je nevratná. Tyto články mají omezené množství reaktantu. Při vybití se reaktanty spotřebují na produkty, které již nelze nabíjením uvést do původního stavu. Těmto článkům se lidově říká baterie. [4]

Naproti tomu sekundární články lze díky vratným chemickým reakcím opakovaně nabíjet a vybíjet. Mají sice také omezené množství reaktantu jako primární baterie, avšak reakční produkty vzniklé vybíjením článků lze uvést na původní reaktanty pomocí vnějšího elektrického proudu. Napětí jednoho článku je nízké, pohybuje se mezi 1,2 až 2 V dle typu akumulátoru, a proto se z nich sestavují akumulátorové baterie pro dosažení vyššího napětí. Akumulátory lze rozdělit podle typu elektrolytu v sekundárním článku na akumulátory kyselé (olověné), alkalické (např. Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-Zn, Ni-MH) a v poslední době čím dál častěji používané akumulátory s nevodnými, tuhými či roztavenými elektrolyty. Životnost akumulátoru je limitována určitým počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů. Běžně se tato hodnota pohybuje ve stovkách až tisících cyklů. [4]

Výhody akumulátorů:

- V praxi osvědčená technologie
- Okamžitá záloha

Nevýhody akumulátorů:

- Nejsou ekologické
- Bezpečnost
- Delší doba nabíjení v porovnání s některými jinými technologiemi

### 5.1.3 Elektromagnetická akumulace

U elektrické akumulace nedochází ke zbytečným přeměnám na jiné formy energie, a proto se jedná o nejlepší možné řešení. Ale současné technologické možnosti jsou omezené. Jedná se především o systém SMES a o akumulaci elektrické energie v superkapacitorech. [1]

#### SMES

SMES (Superconducting magnetic energy storage) je systém uskladnění energie v magnetickém poli vytvořeném po průtoku stejnosměrného proudu supravodivou cívkou. Díky kryogennímu chlazení je zajištěna supravodivost cívky. Po nabití cívky se vytvoří magnetické pole, jehož energii lze uchovat za stálého chlazení neomezeně dlouho. Součástí systému jsou dále stabilizátor napětí a řídicí jednotka. Jedná se o vysoce efektivní způsob akumulace energie, kdy účinnost dosahuje 95 %. Jde o systém, který je stále ve fázi vývoje. [8]

Výhody SMES:

- Velmi vysoká účinnost
- Okamžitá záloha

Nevýhody SMES:

- Malá energetická kapacita
- Technologie ve fázi výzkumu

## Superkapacitory

U superkapacitorů stejně jako u obyčejných kondenzátorů je elektřina ukládána v elektrostatickém poli mezi dvěma deskami. Vysoké kapacity se dosahuje elektrodami s pórovitým povrchem, jelikož kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše elektrod. Elektrody jsou pak odděleny polypropylenovou fólií a prostor je vyplněn elektrolytem. Výsledkem je vysoká kapacita s malým sériovým odporem, díky kterému je možné rychlé nabití, vybití a dosažení vysokých špičkových výkonů. To je zejména vhodné v aplikacích, kde potřebujeme dosáhnout krátkodobě vysokých výkonů. Další výhodou je velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů a účinnost přes 95 %. Srovnání technických parametrů superkapacitorů s obyčejnými kondenzátory a akumulátory lze vidět v Tab. 4 [9]

Tab. 4 Porovnání technických parametrů akumulátorů, kondenzátorů a superkapacitorů [9]

Parametr	Ni-MH akumulátor	Klasický kondenzátor	Superkapacitor
Hustota energie	100 Wh/kg	0,2 Wh/kg	10 Wh/kg
Měrný výkon	1 kW/kg	500 kW/kg	10 kW/kg
Doba nabíjení (vybíjení)	5 h	0,001 s	10 s
Životnost	1000 cyklů	1 000 000 cyklů	500 000 cyklů

Výhody superkapacitorů:

- Vysoká účinnost a rychlost nabíjení
- Velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů

Nevýhody superkapacitorů:

- Menší množství energie uložené na jednotku váhy než u elektrochemických akumulátorů
- Jen krátkodobá záloha

## 5.2 Akumulace energie do vodíku

Systém akumulace energie do vodíku v sobě zahrnuje tři již dříve popsané technologické procesy. Jsou to výroba vodíku, jeho skladování a následná přeměna na elektrickou energii v palivových článcích.

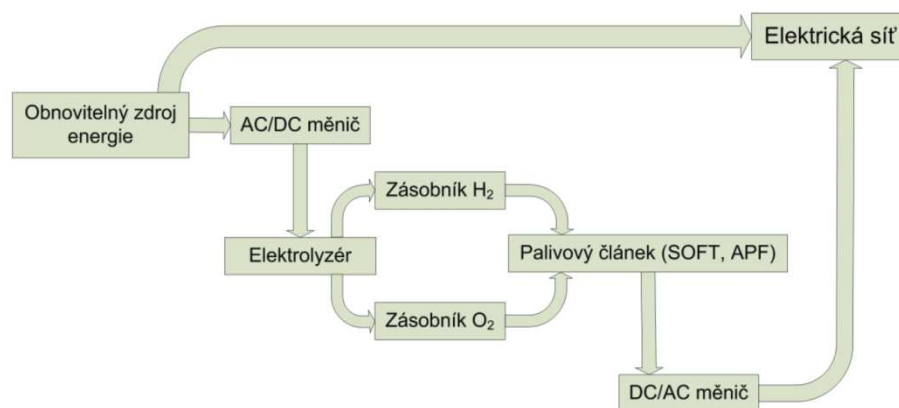


Obr. 11 Princip akumulace elektrické energie do vodíku [25]

Účinnost celého cyklu akumulace energie do vodíku a výroby elektrické energie (elektřina → vodík → elektřina) je dána součinem účinností jednotlivých přeměn energie a ztrát při skladování.

Účinnost přeměny na elektrickou energii pak dosahuje přibližně 30–40 %. Po započtení účinnosti výroby elektrické energie nutné pro výrobu vodíku, která se v dnešní době vyrábí převážně z fosilních paliv (cyklus uhlí → elektřina → vodík → elektřina), klesne výsledná účinnost pouze asi na 12–16 %.

Akumulace energie do vodíku získá ještě více na významu ve spojení s obnovitelnými zdroji elektrické energie. Jestliže se takto vyrobená energie použije k výrobě vodíku a přeměněna zpět na elektrickou energii probíhá v palivových článcích, jsou výslednými produkty jen teplo a voda. Blokové schéma systému akumulace energie do vodíku ve spojení s obnovitelnými zdroji můžeme vidět na Obr. 12.



Obr. 12 Schéma akumulace ve spojení s OZE a elektrickou sítí [1]

Výhody akumulace do vodíku:

- Ekologicky čisté palivo
- Velký rozsah výkonů od wattů až po megawatty
- Při vhodném skladování možnost akumulace velkého množství energie
- Možnost použití v energetických i v mobilních aplikacích

Nevýhody akumulace do vodíku:

- Vodík nelze těžit, musí se vyrábět
- Vysoké požadavky na použité materiály
- Bezpečnost

### 5.3 Porovnání různých systémů akumulace elektrické energie

Na systémy akumulace elektřiny je kladena řada protichůdných požadavků a každá z různých technologií má své výhody a nevýhody. Mezi nejdůležitější vlastnosti akumulčních systémů jsou:

- Velikost a kapacita, respektive měrná hustota energie
- Maximální výkon a doba náběhu
- Doba po jakou může energii uchovat a velikost samovybití
- Účinnost a její případný pokles s časem
- Investiční náklady a cena za akumulovanou kWh
- Životnost a počet cyklů
- Bezpečnost a vliv na životní prostředí

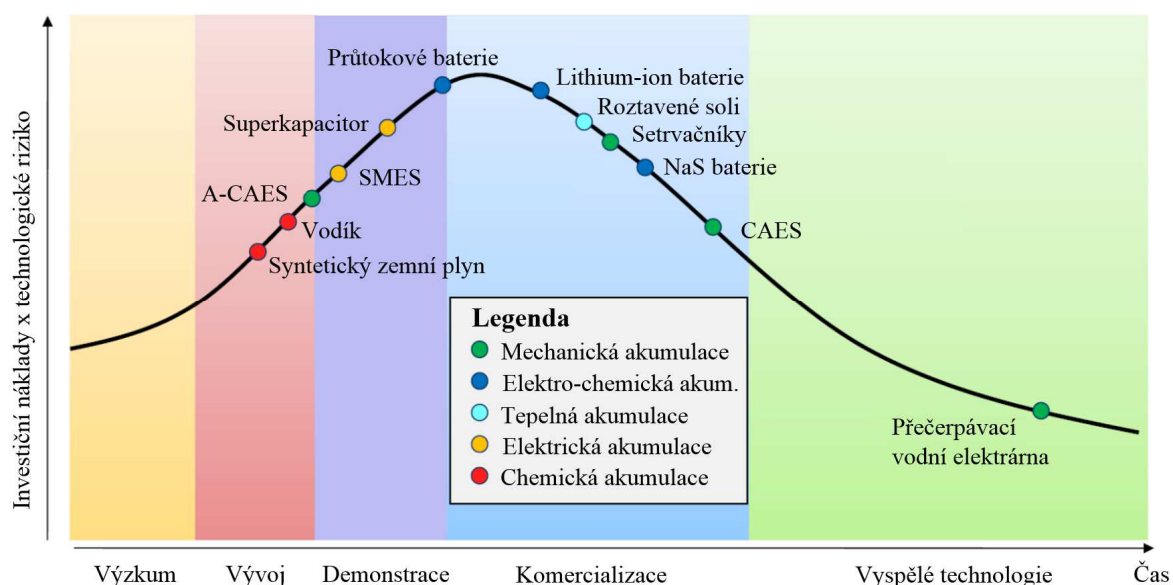


Porovnání různých technologických možností akumulace je uvedeno v Tab. 5. Udávaná životnost akumulace do vodíku je dána především životností palivových článků případně elektrolyzátoru. Může být různá v závislosti na typu použitých palivových článků. U některých technologií, které ještě nejsou dlouhodoběji otestovány v provozu, se jedná o odhad životnosti.

Tab. 5 Porovnání vybraných technologií akumulace elektrické energie [28] [31] [32] [33] [34]

Akumulační technologie	Energie (MWh)	Výkon (MW)	Doba vybíjení	Účinnost (%)	Životnost (let)	Cyklů	Samo-vybíjení (%/den)	Rychlost startu
PVE	> 1000	< 5000	h	70–85	40–60	$20 \cdot 10^3$	~ 0	s – min
CAES	100–1000	100–300	h	50–89	20–60	$30 \cdot 10^3$	malé	s – min
SMES	< 0,01 kWh	0,001–10	s	95–98	> 20	$10^5$	10–15	< s
Pb aku	0,1	0,001–50	min – h	70–90	5–15	$10^3$	0,1–0,3	< s
Li-ion aku	0,1	0,001–0,1	min – h	85–90	5–15	$5 \cdot 10^3$	0,1–0,3	< s
Superkap.	< 0,001	0,01–1	s	90–95	> 20	$10^5$	20–40	< s
<b>Vodík</b>	<b>1–1000</b>	<b>0,001–50</b>	<b>min – h</b>	<b>30–45</b>	<b>5–15</b>	<b><math>10^3</math>–<math>10^4</math></b>	<b>0–4</b>	<b>s – min</b>
Setrvačník	0,001–0,01	0,002–20	s – min	85–95	15	$10^5$	100	< s

Jednotlivé možnosti akumulace se nacházejí v různých stádiích pokroku. Od fází počátečního výzkumu, až po osvědčené v praxi dlouhodobě zavedené technologie. Následující obrázek porovnává různé technologie využití pro akumulaci energie při zohlednění výše investičních nákladů, technologického rizika se současnou aktuální technologickou vyspělostí.



Obr. 13 Vyspělost technologií akumulace využitelných pro síťový provoz [32]

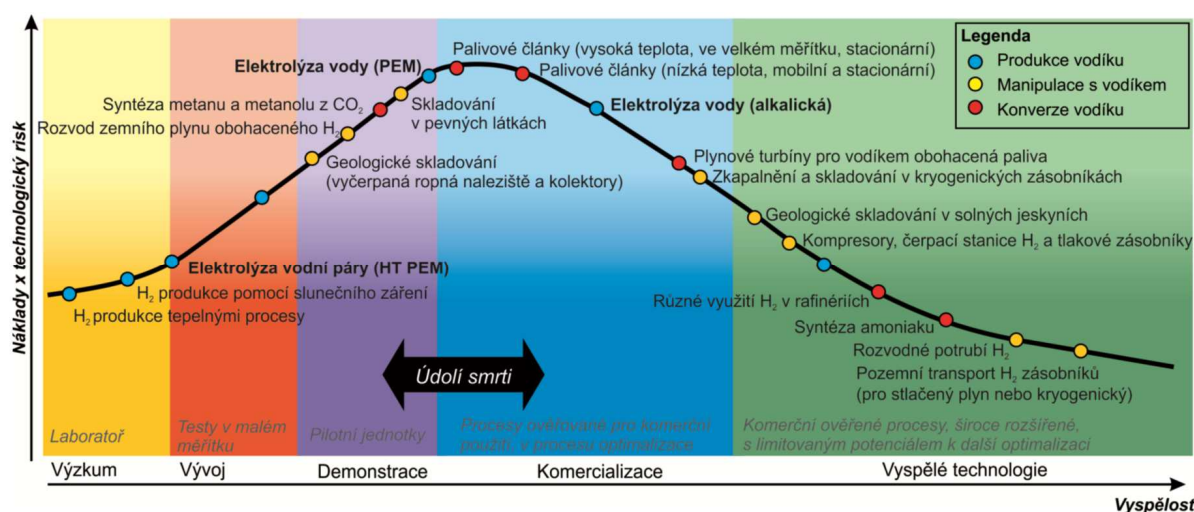
Technologií pro akumulaci elektrické energie je mnoho. Avšak jak je patrné z Obr. 13, většina těchto technologií zatím není vhodná pro komerční použití. V dnešní době existuje prakticky



pouze jediná vyspělá a léty osvědčená možnost akumulace energie ve větším měřítku, a tou jsou přečerpávací vodní elektrárny. Ale každý systém, ať už je ve fázi vývoje nebo v komerčním nasazení, má své výhody a nevýhody a podle nich je vhodný pro určité aplikace

## 5.4 Perspektiva akumulace do vodíku

V dnešní době se vodík stále primárně využívá jako chemická surovina. V blízké budoucnosti lze však předpokládat, že bude čím dál častěji využíván jako nosič energie. Aby byl vodík konkurenceschopný jiným palivům, musí se vyřešit ještě hodně technologických problémů při jeho výrobě, skladování a přeměně na elektrickou energii. Stupeň pokročilosti jednotlivých vodíkových technologií lze vidět na Obr. 14.



Obr. 14 Vyspělost jednotlivých vodíkových technologií [29]

Využití vodíkových technologií lze v budoucnosti očekávat v širokém spektru aplikací a velkém rozsahu výkonů. Mezi základní odvětví, kde nalezne největší uplatnění, můžeme označit tyto: [17]

- Energetika
- Doprava
- Mobilní (přenosné) aplikace
- Kogenerace

### Využití vodíku v energetice

Budoucnost vodíku v energetice je především ve dvou aplikacích – akumulace energie a záložní zdroje napájení. Akumulace do vodíku může mít velký význam s předpokládaným nárůstem obnovitelných zdrojů. Jejich produkce elektřiny je těžko předvídatelná a dodávka do rozvodné sítě nestabilní. Ukládáním energie do vodíku nebo naopak jejím čerpáním lze pak stabilizovat energetickou soustavu. Vodík může rovněž pomoci k decentralizaci energetických zdrojů a vzniku ostrovních systému napájených obnovitelnými zdroji v kombinaci s akumulací energie do vodíku. [17]

Využití jako nouzové zdroje najdou uplatnění palivové články v provozech, kde je nutná vysoká spolehlivost dodávky elektrické energie. Jedná se zejména o nemocnice, letiště, banky apod. Zde by mohli nahradit v současnosti nejčastěji využívané dieselaagregáty či bateriové UPS. [17]

### **Využití vodíku v dopravě**

Největší využití vodíku v blízké budoucnosti se očekává v dopravě. Zde najde uplatnění ve všech oblastech dopravy, počínaje pozemní, přes lodní až po leteckou. Nejdůležitější oblastí je však automobilová doprava, kde první automobily na vodík jsou již několik let v provozu. Zásadní problém v současnosti je zatím nedostatečná infrastruktura, čili absence vodíkových stanic a vysoká cena vodíkových vozidel. [17]

### **Využití vodíku pro mobilní aplikace**

Palivovými články lze také napájet drobné přenosné spotřebiče, jako jsou notebooky, mobilní telefony, ruční nářadí apod. Zde však místo vodíku se očekává využití etanolu nebo metanolu, s ohledem na vyšší hustotu energie kapalných látek a větší bezpečnost. [17]

### **Kogenerační jednotky**

Perspektivní se jeví i použití vodíku v kogeneračních jednotkách. Kogenerační jednotka je schopná pracovat v režimu kombinované výroby tepla a elektřiny, což umožňuje zvýšení účinnosti využití energie paliv na celkovou účinnost až 85 %. Mikrokogenerační jednotky by mohli být instalovány v obytných domech či menších firmách. Ve spojení s obnovitelnými zdroji, např. solárními panely instalovanými na střeše by mohli zajišťovat energetickou nezávislost těchto objektů. Větší kogenerační jednotky s palivovými články mohou pak být alternativou k současným teplárnám. [27]

## 6. Realizované projekty

V této kapitole budou uvedeny příklady tří, již realizovaných projektů využití vodíku pro akumulaci elektrické energie v České republice a v zahraničí.

### 6.1 Vodíkové technologie v ÚJV Řež

Jde o zařízení k akumulaci elektrické energie do olověných akumulátorů a vodíku, vyrobené 60 ti kusy modulů fotovoltaických panelů umístěných na střeše jídelny ÚJV Řež, které napájí fiktivní domácnost. Elektrárna je rozdělena na dvě části, větší s výkonem 7,36 kWp slouží k napájení akumulátorů a elektrolyzéro, který vyrábí vodík. Menší část o výkonu 5,5 kWp slouží k testování ukládání elektřiny pouze v olověných akumulátorech. Princip je takový, že pokud produkce elektřiny z fotovoltaických panelů překračuje okamžitou spotřebu, je přebytečná elektrická energie ukládána v akumulátorech. Pokud jsou akumulátory plně nabity, využívá se přebytečný výkon v elektrolyzéro Hogen S40, na výrobu vodíku. Maximální produkované množství vodíku je 1,05 m<sup>3</sup>/hod, což odpovídá hmotnosti 2,29 kg/den. Čistota produkovaného vodíku je 99,99995 % a maximální výstupní přetlak vodíku pak 13,8 bar. Vodík je poté skladován v tlakové nádrži s kapacitou cca 330 kWh a maximálním provozním tlakem 15 bar. V případě nedostatku energie z fotovoltaických panelů a akumulátorů se o zpětnou přeměnu vodíku na elektrickou energii stará palivový článek Fronius Energy Cell 50F s výkonem 4 kW a vstupním pracovním tlakem 5–15 bar. [35] [36]



Obr. 15 Zařízení pro akumulaci elektrické energie do vodíku v areálu ÚJV Řež [35]

Technické parametry systému jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 6 Technické parametry systému [35]

Zařízení	Parametr	Hodnota
Fotovoltaické panely	Špičkový výkon	7,36 kWp
Olověné gelové akumulátory	Kapacita	45 Ah (2,2 kWh)
Elektrolyzátor PEM	Max. příkon	6,7 kW
Palivový článek PEM	Max. elektrický výkon	4 kW
Vodíková zásobní nádrž	Využitelná hmotnost	10 kg (při 5–15 bar)

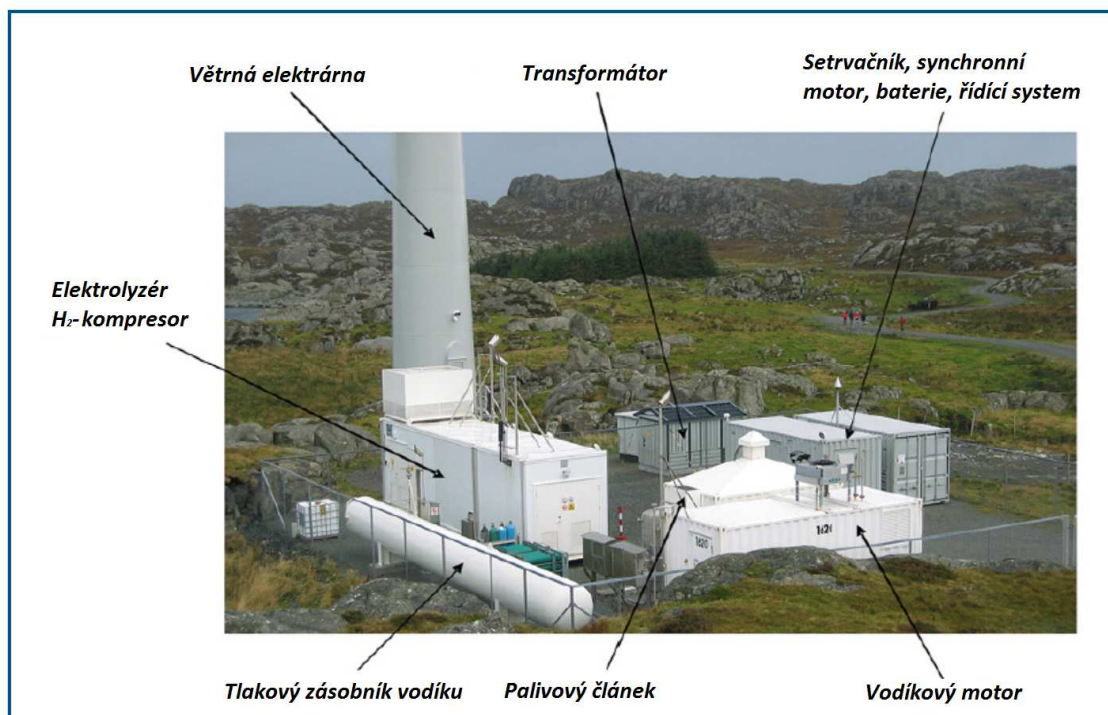
Během provozu bylo dosaženo následujících účinností jednotlivých systémů: [36]

- elektrolyzátor: 63 %
- palivový článek: 49 %
- systém celkem: 31 %

Projekt byl realizován v letech 2010–2013 s testovacím provozem v roce 2014. Vývoj celého systému měl rozpočet 15 mil. Kč, z čehož 40 % bylo financováno z vlastních zdrojů ÚJV ŘEŽ. Partnerem tohoto projektu byla i společnost vyrábějící elektrolyzátor Proton Energy. [36]

## 6.2 Utsira (Norsko)

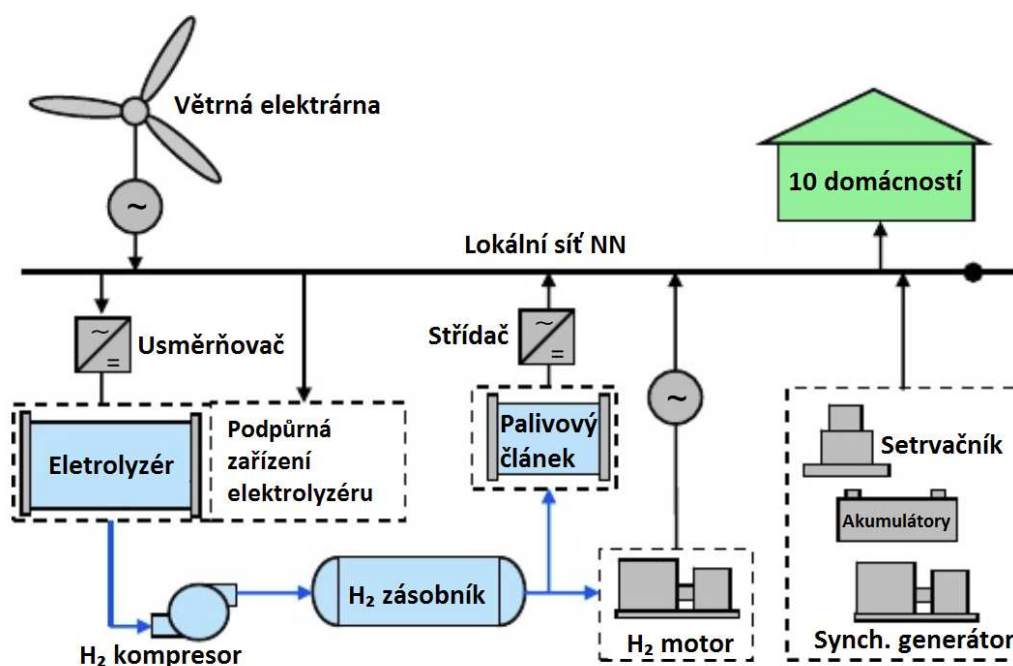
Utsira je norský ostrov o rozloze 6 km<sup>2</sup>, kde v letech 2004 až 2008 probíhal projekt nazvaný Utsira Wind Power & Hydrogen Plant. Ten měl za úkol demonstrovat možnost skladování přebytků elektrické energie, vyrobené větrnými elektrárnami do vodíku.



Obr. 16 Demonstrační zařízení akumulace energie do vodíku na ostrově Utsira [38]



Na pobřeží ostrova byly instalovány dvě větrné elektrárny Enercon E40, každá o výkonu 600 kW. První dodává energii přímo do sítě, druhá se sníženým výkonem na hodnotu přibližně 150 kW je napojena na samostatný systém. Do tohoto systému je připojeno deset rodinných domů a v případě nouze je zajištěno napájení ze sítě. Stabilizovat napětí a frekvenci v takto izolované síti má za úkol setrvačnick s kapacitou 5 kWh a hlavní synchronní stroj s výkonem 100 kVA. Přebytkovou energii lze pak využít k výrobě vodíku díky elektrolyzáru s maximálním výkonem 10 m<sup>3</sup> vodíku za hodinu a příkonem 48 kW. Vodík je poté skladován s pomocí 5 kW kompresoru v tlakových nádržích s kapacitou 2400 m<sup>3</sup> vodíku, při tlaku 200 bar. Přeměna zpět na elektrickou energii probíhá ve vodíkovém spalovacím motoru MAN o výkonu 55 kW a v 10 kW palivových článcích. [38]



Obr. 17 Princip akumulace větrné energie do vodíku na ostrově Utsira [44]

Projekt probíhal nepřetržitě po dobu 4 let z toho více než 50 % času v autonomním režimu. Kvalita dodávané energie byla velmi dobrá a nebyly zaznamenány žádné stížnosti zákazníků. Přesto projekt odhalil několik nedostatků a závad, například potřebu vývoje účinnějších elektrolyzátorů či se během provozu vyskytly potíže s palivovými články, mimo jiné například únik chladicí kapaliny. Palivové články také rychle degradovaly a jejich životnost byla menší než 100 hodin. [38]

### 6.3 Energiepark Mainz (Německo)

Společnost Siemens uvedla v roce 2015 v německé Mohuči největší elektrolytickou výrobu vodíku s elektrolyzéry PEM na světě, která dokáže pojmout přebytečnou elektřinu z okolních větrných elektráren až do výkonu 6 MW. Hlavní součástí jsou tři vysokotlaké elektrolyzéry Silyzer 200 se speciální membránou propustnou pouze pro protony (PEM), které jsou schopny provozu během několika sekund. Každý z elektrolyzátorů má špičkový výkon 2 MW, trvalý pak 1,3 MW. Díky vysokému výstupnímu tlaku 35 bar není pro další využití vodíku nutné jeho další stlačování. [37]



Obr. 18 Vodíkové technologie v Energiepark Mainz [37]

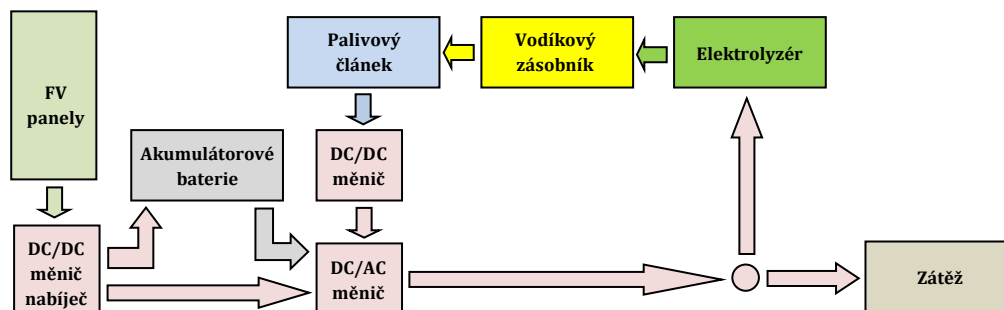
Vyrobený vodík je následně uskladněn v tlakových nádobách se skladovací kapacitou 26 MWh. Poté je cisternami rozvážen do čerpacích stanic pro vodíková auta nebo přidáván do distribuční sítě zemního plynu a může být využit v plynových elektrárnách nebo kogeneračních jednotkách pro zpětnou výrobu elektřiny. Realizace celého projektu trvala tři roky a vyšla na 17 milionů eur. Kromě firmy Siemens se na projektu podíleli i odborníci ze společnosti Linde a RheinMainské univerzity. [37]

## 7. Analýza dat z hybridního akumulčního systému

Tato kapitola zahrnuje analyzovaná data získaná měření na elektrolyzáru Hogen GC600 a modulu palivových článků NEXA. Tato zařízení jsou součástí hybridního energetického akumulčního systému instalovaného v areálu VŠB-TU Ostrava.

### 7.1 Popis systému

Hybridní akumulční systém využívá jako primární zdroj energie energii z fotovoltaických panelů. Ta je následně ukládána v elektrochemických akumulátorových bateriích a část také pomocí elektrolyzáru do vodíku. Přeměna vodíku na elektrickou energii pak probíhá v palivových článcích typu PEM. Celý energetický systém je zobrazen na následujícím blokovém schématu a jeho hlavní součásti budou popsány v následujícím textu.



Obr. 19 Blokové schéma hybridního akumulčního systému v laboratoři palivových článků

#### Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely slouží jako hlavní energetický zdroj celého hybridního systému akumulace. Panely jsou umístěné na střeše objektu laboratoře palivových článků. Celá instalace je orientována na jih se sklonem 50°. Systém fotovoltaických panelů obsahuje 12 polykrystalických panelů typu SCHOT POLY 165 s nominálním instalovaným výkonem 165 Wp, celkový výkon tedy činí 1980 Wp. Panely jsou zapojeny sério-paralelně do 4 paralelních sekcí po 3 kusech v sérii pro zajištění dostatečného pracovního napětí nabíječe akumulátorových baterií.

#### Akumulátorové baterie

Sada akumulátorových baterií (akumulátorová banka) je tvořena čtyřmi olověnými bezúdržbovými akumulátory FIAMM FLB300 o jmenovité kapacitě 75 Ah v sériovém zapojení o celkovém jmenovitém napětí 48 V. Hlavní funkcí akumulátorových baterií v energetickém systému je akumulace přebytečné elektrické energie vyrobené z fotovoltaických panelů. Další význam mají akumulátorové baterie ve funkci energetického „bufferu“ ze kterého je kryta spotřeba elektrolyzáru při dočasném omezení dodávky energie z fotovoltaických panelů, která je zapříčiněná nepříznivými lokálními povětrnostními podmínkami.

## Měniče

Vyjma měniče, který je pevnou součástí elektrolyzéru, obsahuje celý systém tři výkonové měniče. Jde o jeden střídač a dva stejnosměrné měniče tzv. DC/DC konvertory. Úkolem stejnosměrných měničů je regulovat příjem energie do stejnosměrné sběrnice, ze které se přivádí výkon na svorky střídače.

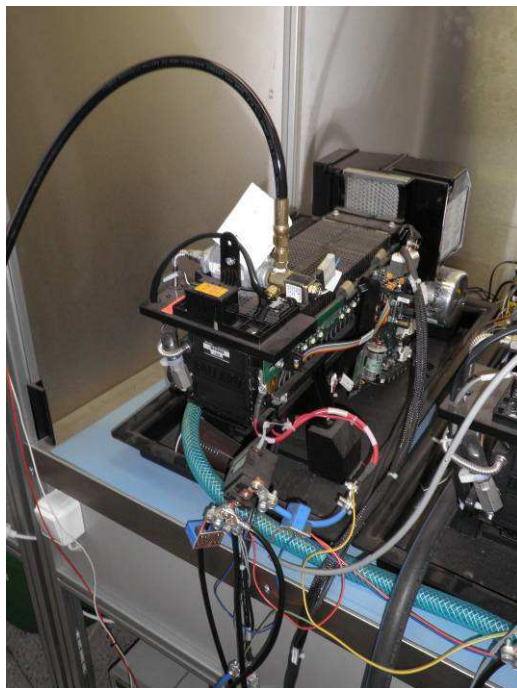
První DC/DC konvertor slouží pro transformaci přivedené energie z fotovoltaických panelů na požadovanou napěťovou úroveň stejnosměrné sběrnice a zároveň slouží k nabíjení akumulátorové banky. Zařízení představuje nabíječ SMA SUNNY Charger 40. Nabíječ umí automaticky vyhledat optimální pracovní bod dle poměrů na fotovoltaike pro zajištění maximálního výstupního výkonu a současně reguluje nabíjení akumulátorových baterií.

Druhý DC/DC konvertor je použit pro stabilizaci výstupního napětí z modulu palivových článků. Jde o DC/DC měnič typu MEANWELL SD-1000L-48, který energii z palivových článků transformuje na stabilní hodnotu napětí 48 V.

Třetím výkonovým měničem je střídač typu SMA SUNNY ISLAND 4248 s nominálním výkonem 4,2 kW. Ten transformuje elektrickou energii ze stejnosměrné sběrnice nebo modulu palivových článků (dle provozního módu) na standardní střídavé napětí distribuční sítě NN (230 V, 50 Hz) pracující v ostrovním režimu.

## Modul palivových článků NEXA a jeho příslušenství

Použit je nízkoteplotní palivový článek Nexa Power Module typu PEM od kanadské firmy Ballard o jmenovitém výstupním výkonu 1,2 kW a jmenovitém výstupním napětí 26 V (další technické parametry jsou uvedeny v Příloha A). Jako palivo využívá tento článek plynný vodík a vzduch, ze kterého si odebírá potřebné množství kyslíku. Z důvodu ne hospodárnosti systému je při výrobě elektrické energie palivovým článkem blokováno nabíjení akumulátorů pomocí stykače.



Obr. 20 Modul palivových článků NEXA v laboratoři palivových článků



Palivový článek je pro účely měření, diagnostiky a vizualizace jeho parametrů připojen pomocí rozhraní RS485 a dále převodníku komunikačního protokolu RS485/RS232 k měřicímu počítači, kde jsou zpracovány i další měřicí a vizualizační aplikace pro celý energetický systém. Vodík spotřebovaný palivovým článkem je měřen hmotnostním průtokoměrem typu AALBORG GFM, který je připojen pomocí rozhraní RS232 k počítači, kde je zajištěno další zpracování dat. Záznam okamžitých hodnot průtoků probíhá v sekundových intervalech. [39]

Modul palivových článků NEXA Power Module je plně integrovaný systém vyrábějící neregulovanou stejnosměrnou elektrickou energii. Skládá se ze spojení palivových článků do bloku tzv. stacku a dalších podpůrných zařízení, které však nejsou nezbytné pro provoz samotného stacku palivových článků. Tyto podpůrná zařízení zajišťují dodávku paliva (regulační ventily tlaku a oddělovací ventily), přívod okysličovadla (vzduchu) dodávaného kompresorem a chlazení celého zařízení pomocí ventilátoru. Důležitým prvkem systému je ventil pro odpouštění vodíku tzv. profuku vodíku. Jedná se o plně procesorově řízené zařízení, kde nainstalované snímače sledují výkon a veličiny subsystémů. Přítomny jsou rovněž bezpečnostní systémy. [39]

Modul palivového článku NEXA má z pohledu výstupních charakteristik dva specifické výstupní výkony. První je výkon, který je dostupný na svorkách modulu NEXA pro připojení zátěže (výkon na zátěži) a druhý výkon je měřitelný přímo na svorkách stacku palivových článků (výkon na stacku). Zatěžovací charakteristika modulu je velmi měkká a dle velikosti výstupního výkonu se výstupní napětí mění v rozsahu až přibližně 40 %. Z tohoto důvodu jsou kladeny vysoké nároky na střídač napětí a jeho parametry z důvodu stabilizace výstupního střídavého napětí. [39]

Pro měření elektrických a neelektrických veličin a vyhodnocení dalších energetických parametrů modulu NEXA byla v minulosti navržena a realizována měřicí stanice. Ta je tvořena měřicími čidly, jejichž signál je zpracováván měřicí kartou a poté počítačem. Čidla jsou realizována pomocí napěťových a proudových čidel LEM. Mezi měřené parametry patří napětí stacku palivových článků, jejich stackové proudy a výstupní proudy (tedy bez vlastní spotřeby).

### **Elektrolyzér Hogen GC600 a jeho příslušenství**

Výrobu vodíku v energetickém akumulacním systému zajišťuje elektrolyzér Hogen GC600, který generuje vodík za pomoci protonových membrán (PEM). Elektrolyzér je napájen střídavým napětím 230 V/50 Hz a je schopen dodávat plynný vodík o tlaku až 1,38 MPa (detailnější technické parametry jsou uvedeny v Příloha B). Elektrolyzér potřebuje ke svému chodu jako vstupní surovinu demineralizovanou vodu, kterou dodává osmotická filtrační jednotka typu DEMIWA. [43]

Vyrobené množství vodíku je měřeno obdobně jako u palivového článku pomocí hmotnostního průtokoměru typu AALBORG XFM. Přímé propojení elektrolyzérů s řídicím systémem zajišťuje stíněný kabel. Elektrolyzér je možné ovládat a nastavovat dvěma způsoby, a to buď prostřednictvím původních ovládacích prvků či za pomoci uživatelského rozhraní řídicího systému.

Tento typ elektrolyzérů je určen především pro laboratorní účely v chemických či jiných laboratořích za účelem vyvíjení čistého vodíku, který slouží pro diagnostické přístroje jako referenční chemické činidlo. Z tohoto důvodu, je elektrolyzér uzpůsoben pro napájení ze standardní rozvodné sítě nízkého napětí. [43]



Obr. 21 Elektrolyzér Hogen GC600

### Skladování vodíku

Pro skladování vodíku jsou k dispozici tři standartní tlakové láhve, každá o vodním objemu 50 l ( $\text{dm}^3$ ) a přepočítaným objemem jímaného plynného vodíku cca. 2  $\text{m}^3$  ve svazku respektive přibližně 680 l připadajícím na jednu tlakovou láhev při maximálním provozním tlaku elektrolyzérů.

Rozvody jsou realizovány vysokotlakými plastovými hadicemi, které propojují jednotlivá zařízení – elektrolyzér, palivový článek, zásobníky se stlačeným vodíkem a přívod pro možnost připojení nezávislého zdroje vodíku.



Obr. 22 Tlakové lahve pro uskladnění vodíku

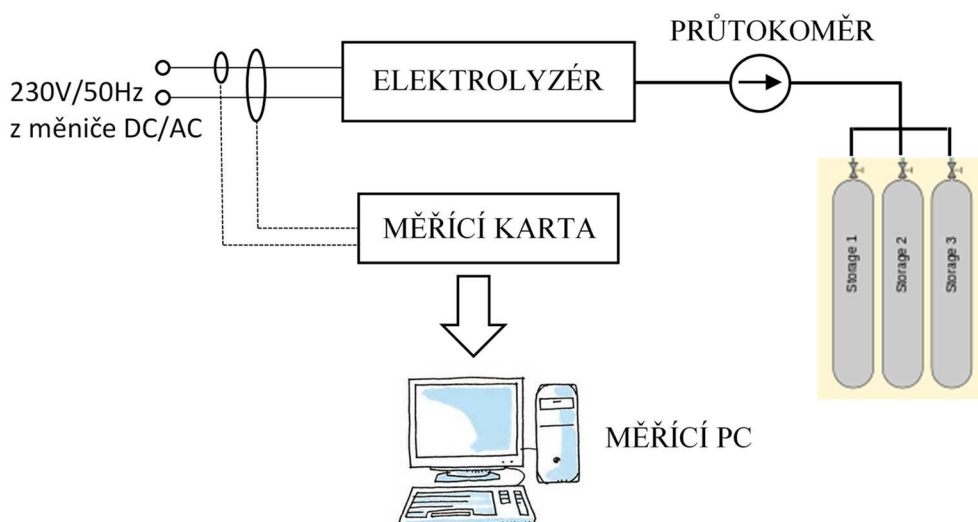
## Měřicí a řídicí systém

Měřicí systém zajišťuje komplexní měření, digitalizaci, zpracování, vizualizaci a archivaci naměřených dat. Je tvořen třemi základními prvky – měřicími moduly, měřicí kartou a počítačem. Měřicí moduly jsou realizovány napěťovými a proudovými LEM čidly, pracujícími na principu „Hallova jevu“. Jako měřicí karta je použita karta s 16-ti bitovým A/D převodníkem model NI 6218 s USB rozhraním.

Celý hybridní energetický systém je ovládán a řízen řídicím systémem, jehož základem je programovatelný automat (PLC) SIMATIC S7-224XP od firmy Siemens. Vizualizace a ovládání je zajištěno pomocí grafického dotykového LCD panelu typu TP177 Micro.

## 7.2 Analýza dat naměřených na elektrolyzáru Hogen GC600

Získaná data obsahují měření spotřeby elektrické energie a množství vyrobeného vodíku elektrolyzérem Hogen GC600. Úkolem analýzy bylo zkonstruovat graficky časovou závislost spotřeby elektrické energie elektrolyzáru (v různých provozních stavech), množství vyrobeného vodíku a dále pak určit účinnost výroby vodíku. Výstupní tlak elektrolyzáru byl nastaven na jeho maximální hodnotu 1,38 MPa.



Obr. 23 Princip měření na elektrolyzáru

## Naměřené hodnoty

Tab. 7 Čas a spotřebovaná energie při zahřívání a tlakování systému

měřená veličina	zahřívání										tlakování			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$E_{EL-start}$ (Wh)	0	1,9	10	19	30	38,6	46	53,1	58,5	63,1	66,8	76	84,2	93

Tab. 8 Množství vyrobeného vodíku v závislosti na čase a spotřebované energii

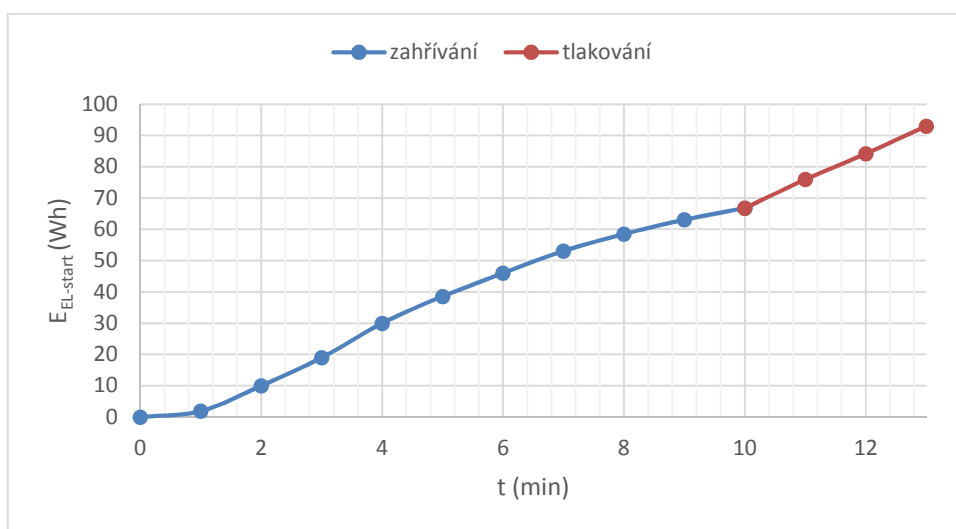
měřená veličina	výroba vodíku (výstupní tlak vodíku 1,38 MPa)												
t (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$E_{ELZ-hydrogen}$ (Wh)	0	42	80	117	152	186	215	247	280	312	347	383	415
$V_{hydrogen}$ (dm <sup>3</sup> )	0	3,9	7,5	10,6	13,8	17,1	20,5	23,7	26,8	30,1	33	36,3	39,5

$E_{EL-start}$  – Elektrická energie spotřebovaná elektrolyzérem Hogen GC600 během startu (zahřívání + tlakování).

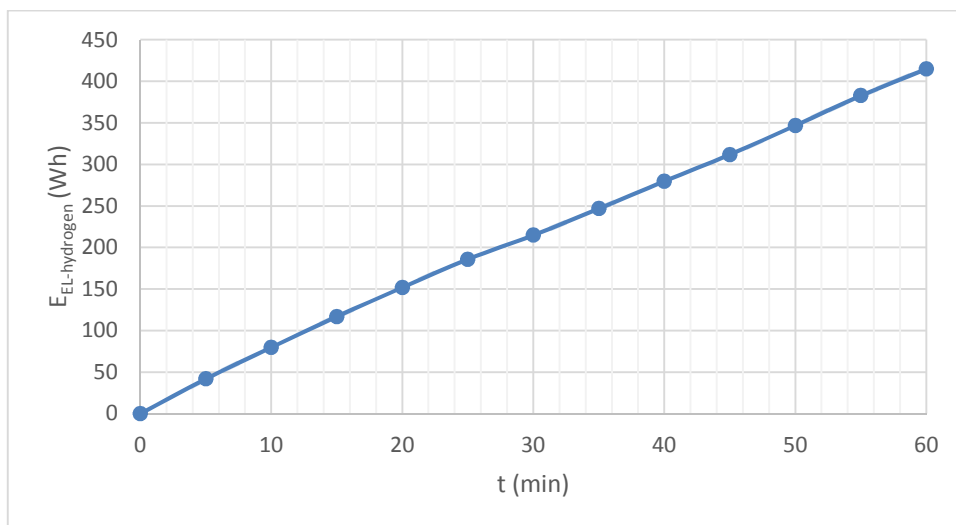
$E_{ELZ-hydrogen}$  – Elektrická energie spotřebovaná elektrolyzérem Hogen GC600 během hodinové výroby vodíku.

$V_{hydrogen}$  – Množství vodíku, vyrobené elektrolyzérem Hogen GC600 v daném čase.

### Grafické závislosti



Graf 1 Spotřeba elektrické energie elektrolyzáru při startu zařízení



Graf 2 Spotřeba elektrické energie elektrolyzáru při výrobě vodíku

### Účinnost výroby vodíku elektrolyzérem

Účinnost výroby vodíku elektrolyzérem je dána vztahem:

$$\eta_{\text{hydrogen}} = \frac{E_{\text{hydrogen}}}{E_{\text{ELZ-hydrogen}}} \quad (7.1)$$

$E_{\text{hydrogen}}$  – ekvivalentní množství energie ve vyrobeném vodíku (Wh) a lze určit ze vztahu:

$$E_{\text{hydrogen}} = \frac{V_{\text{hydrogen}}}{V_{\text{molHydrogen}}} \cdot Q_t \cdot U_{\text{rov}} = \frac{V_{\text{hydrogen}}}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 \quad (7.2)$$

$V_{\text{hydrogen}}$  – množství vyrobeného resp. spotřebovaného vodíku

$V_{\text{molHydrogen}}$  – objem 1 molu vodíku ( $\text{dm}^3$ )

$Q_t$  – velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu 1 molu vodíku (Ah)

$U_{\text{rov}}$  – rovnovážné napětí chemické reakce probíhající v palivovém článku (V)

Po dosazení do rovnice 7.2 je ekvivalentní množství energie v čase  $t = 60$  min. ve vyrobeném vodíku:

$$E_{\text{hydrogen}} = \frac{39,5}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 = 116,18 \text{ Wh} \quad (7.3)$$

Po dosazení do rovnice 7.1 jsme dostali výslednou účinnost výroby vodíku pro maximální výstupní tlak elektrolyzéru:

$$\eta_{\text{hydrogen}} = \frac{116,18}{415} = 0,28 \Rightarrow 28 \% \quad (7.4)$$

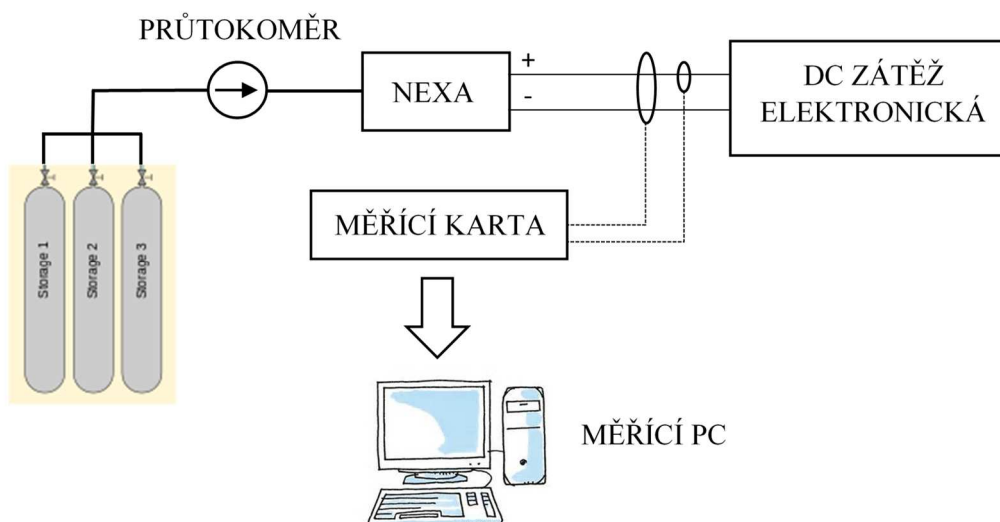
Účinnost výroby vodíku elektrolyzérem Hogen GC600 při maximálním provozním tlaku 1,38 MPa dosahovala 28 %. Do této účinnosti nebyla však započtena spotřeba energie, která byla nutná pro zahřátí a natlakování elektrolyzéru.

### Zhodnocení

Z měřených dat a grafů lze vidět, že doba nutná pro zahřátí a natlakování elektrolyzéru při startu činila 13 minut. Z toho 10 minut byl čas potřebný pro zahřátí, kdy závislost spotřebované energie nebyla v jeho průběhu zcela lineární. Další 3 minuty byly nutné pro natlakování na maximální provozní tlak při lineární spotřebě energie. Rovněž výroba vodíku probíhala při rovnoměrném odběru elektrické energie. Účinnost elektrolyzéru při maximálním provozním tlaku byla pak vypočtena na 28 %, a to bez započtení energie nutné pro start systému.

### 7.3 Analýza dat naměřených na modulu palivového článku

Získaná data obsahují různé měřené veličiny na palivovém článku NEXA Power Module. Cílem analýzy bylo graficky zobrazit různé charakteristiky a závislosti jednotlivých měřených veličin. Pro účely měření byla pro zatížení výstupu z modulu palivového článku použita stejnosměrná elektronická zátěž. Získaná data jsou uvedena v Tab. 9 a Tab. 10.



Obr. 24 Měření na modulu palivových článků NEXA

### Naměřené hodnoty

Tab. 9 Naměřené hodnoty na palivovém článku a určená účinnost

$P_{Load}$ (W)	$P_{Fuel-cells}$ (W)	$P_{Self-con}$ (W)	$P_{Self-con}$ (% z $P_{Fuel-cells}$ )	$E_{Fuel-cells}$ (Wh)	$E_{Self-con}$ (Wh)	$V_{Hydrogen}$ (dm <sup>3</sup> )	$E_{Hydrogen}$ (Wh)	$\eta_{Fuel-cells}$ (%)
0	53,13	53,13	100,0	4,43	4,43	7,3	21,47	20,62
100	159,82	59,82	37,4	13,32	4,99	13,2	38,82	34,31
200	267,23	67,23	25,2	22,27	5,60	17,5	51,47	43,27
300	381,56	81,56	21,4	31,80	6,80	22,1	65,00	48,92
400	496,77	96,77	19,5	41,40	8,06	29,9	87,94	47,07
500	612,34	112,34	18,3	51,03	9,36	37,2	109,41	46,64
600	727,35	127,35	17,5	60,61	10,61	45,2	132,94	45,59
700	847,10	147,10	17,4	70,59	12,26	54,3	159,70	44,20
800	964,29	164,29	17,0	80,36	13,69	61,5	180,88	44,43
900	1100,08	200,08	18,2	91,67	16,67	73,3	215,59	42,52
1000	1265,19	265,19	21,0	105,43	22,10	89,1	262,06	40,23
1100	1472,97	372,97	25,3	122,75	31,08	104,5	307,35	39,94
1200	1599,76	399,76	25,0	133,31	33,31	126,7	372,64	35,77

Tab. 10 Naměřené hodnoty na palivovém článku

<b>P<sub>Load</sub></b> <b>(W)</b>	<b>I</b> <b>(A)</b>	<b>U</b> <b>(V)</b>	<b>V<sub>Hydrogen</sub></b> <b>(dm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>V<sub>Air</sub></b> <b>(dm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>V<sub>Water</sub></b> <b>(dm<sup>3</sup>/h)</b>
0	0	41,9	1,5	22,0	0,02
100	2,6	38,5	2,6	21,5	0,05
200	5,5	36,4	3,3	26,5	0,12
300	8,4	35,6	5,3	37,0	0,17
400	11,6	34,4	6,1	44,9	0,21
500	14,9	33,9	7,2	50,1	0,27
600	18,2	33,0	9,1	54,0	0,34
700	21,8	32,1	11,0	56,9	0,40
800	25,8	31,0	12,3	60,0	0,47
900	30,1	29,9	14,8	64,9	0,56
1000	34,8	28,7	17,8	72,3	0,65
1100	39,5	27,9	20,7	83,5	0,75
1200	45	26,7	25,2	99,0	0,85

**P<sub>Load</sub>** – zatížení modulu palivových článků (výkon na jeho výstupu), nastavené na připojené DC elektronické zátěži (jedná se o „netto“ výkon modulu, bez vlastní spotřeby)

**P<sub>Fuel-cells</sub>** – výkon modulu palivových článků včetně vlastní spotřeby elektřiny (jedná se o „brutto“ výkon modulu, měřený vlastním měřicím systémem modulu)

**P<sub>Self-con</sub>** – příkon podpůrných systémů modulu palivových článků v rámci vlastní spotřeby (jedná se o rozdíl mezi P<sub>Fuel-cells</sub> a P<sub>Load</sub>)

**E<sub>Fuel-cells</sub>** – elektrická energie vyrobená modulem palivových článků („brutto“ výroba) za dobu 5 minut při dané nastavené zátěži

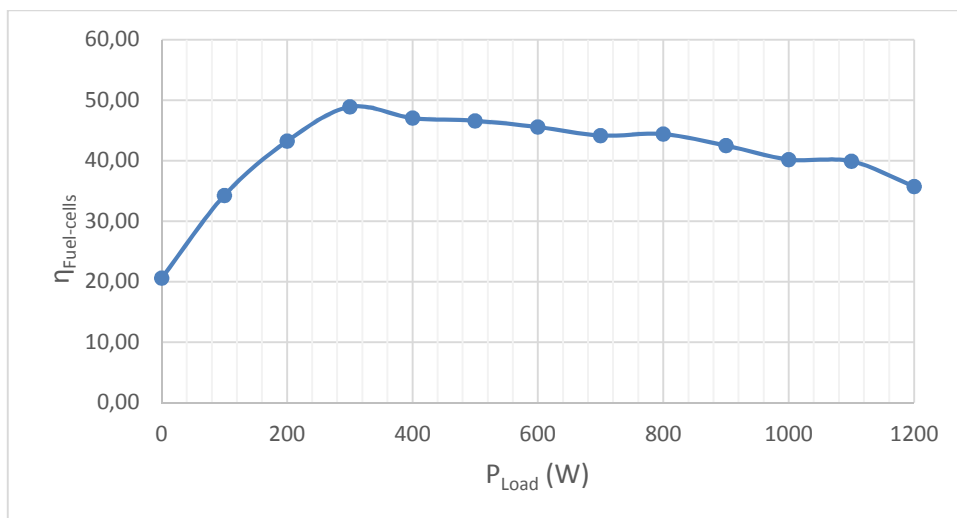
**E<sub>Self-noc</sub>** – elektrická energie spotřebovaná podpůrnými systémy za dobu 5 minut (vlastní spotřeba)

**V<sub>Hydrogen</sub>** – množství vodíku spotřebované modulem za dobu 5 minut při dané nastavené zátěži

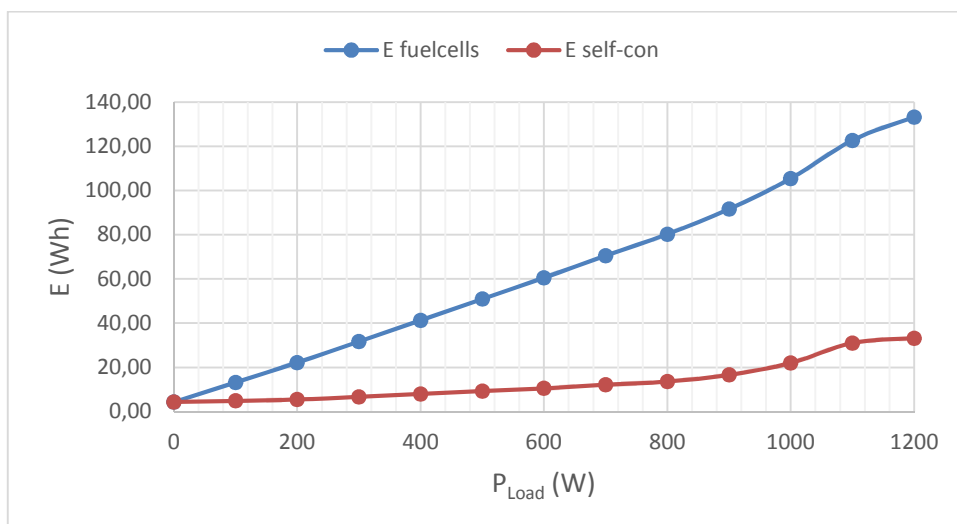
**E<sub>Hydrogen</sub>** – ekvivalentní množství energie ve spotřebovaném vodíku viz. rovnice 7.2

**η<sub>Fuel-cells</sub>** – účinnost výroby elektrické energie modulem palivových článků

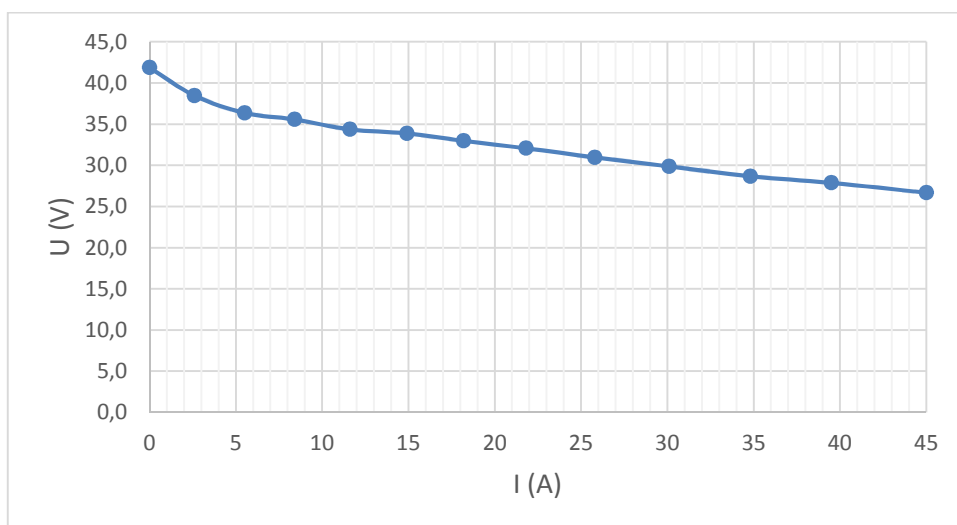
## Grafické závislosti



Graf 3 Závislost účinnosti palivové článku na jeho zatížení („netto“ výkon)

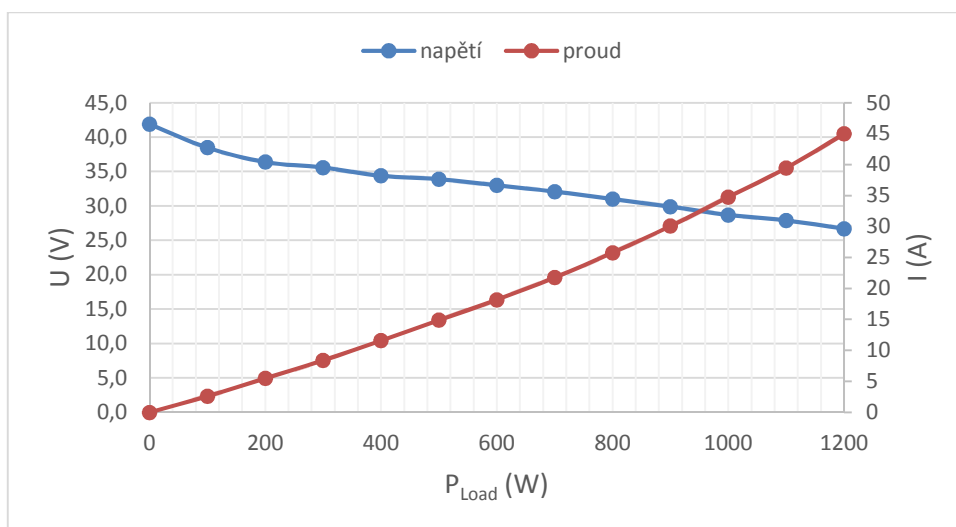


Graf 4 Závislost vlastní spotřeby a vyrobené energie na výkonu článku

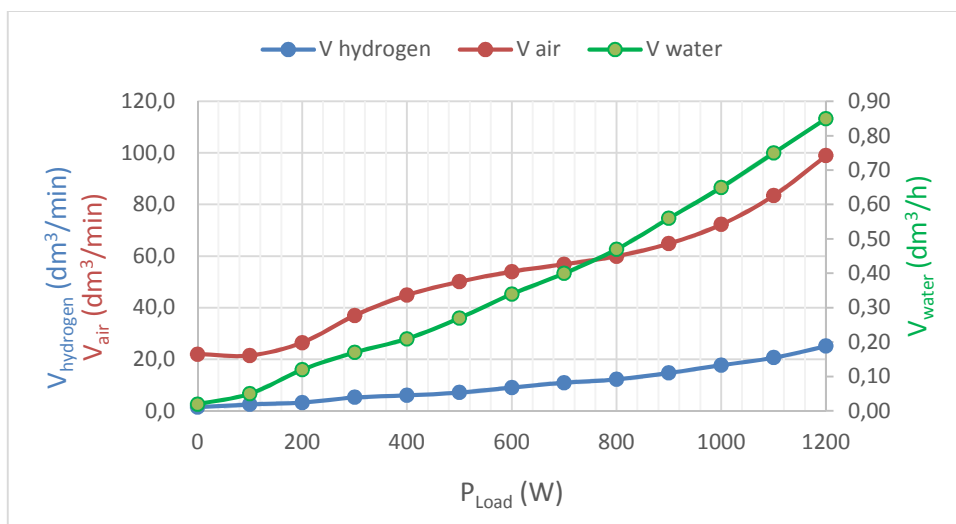


Graf 5 V-A charakteristika modulu palivového článku





Graf 6 Zatěžovací charakteristika modulu palivových článků



Graf 7 Spotřeba vodíku, vzduchu a výroba vody v závislosti na výkonu modulu

## Zhodnocení

Z dat získaných při měření parametrů modulu palivových článků NEXA byla zjištěna maximální účinnost palivového článku 48,9 % při zatížení 300 W, což je 25 % maximálního výkonu. Při vyšším i nižším zatížení než 300 W se účinnost snižuje díky horšímu poměru vlastní spotřeby k množství spotřebovaného vodíku. Při maximálním výkonu dosahoval modul NEXA účinnosti přibližně 36 %. Dále lze vidět „měkkou“ V-A charakteristiku, kdy výstupní napětí modulu velmi rychle klesá se zatížením článku. Na posledním grafu Graf 7 lze vidět, že palivový článek potřeboval pro svůj chod zhruba čtyřikrát více vzduchu než vodíku, jelikož ze vzduchu využíval pouze kyslík, který tvořil pouze část jeho objemu. Lze říci, že data získaná měřením na modulu palivových článků NEXA, a také na elektrolyzáru Hogen GC600, odpovídají technickým parametrům a provozním charakteristikám udávaných výrobcí obou těchto zařízení.

## Závěr

Vodík a vodíkové technologie v sobě skrývají velký potenciál a mohou se stát v budoucnu jednou z hlavních technologií, jak energeticky zajistit průmysl, dopravu a další lidská odvětví. Ve spojení s obnovitelnými zdroji mohou také přispět k větší decentralizaci energetické soustavy.

Tato bakalářská práce se snažila přiblížit současné technické možnosti vodíkových technologií, především pak v energetice, kde můžou v budoucnu hrát důležitou roli v systému akumulace energie. Jednotlivé technologie se nacházejí v různých fázích vývoje. Mezi relativně pokročilé technologie můžeme zařadit alkalickou elektrolýzu vody, skladování vodíku v tlakových lahvích či nízkoteplotní palivové články. Tyto technologie se nacházejí již v komerčním provozu. V dalších letech lze očekávat nasazení dalších perspektivních technologií, jako například vysokoteplotní elektrolýza, vysokoteplotní palivové články či skladování vodíku v metalhydridech. Avšak k větší konkurenceschopnosti vodíkových technologií a jejich využití v energetice ve větším měřítku bude potřeba dalších mnoha let výzkumu a vývoje v této oblasti a zavádění nových inovativních technologií. Je nutné především snížit výrobní náklady, zvýšit spolehlivost, životnost a účinnost celého technologického procesu akumulace energie do vodíku.

V mnoha vyspělých zemích světa běží již mnoho demonstračních i komerčních projektů akumulace energie do vodíku. Významnou roli při zavádění těchto projektů do praxe hraje přístup vlád jednotlivých zemí a jejich podpora těmto projektům. Česká republika v tomto směru na nejvyspělejší země zaostává. Chybí jí zejména dlouhodobější strategie a užší spolupráce mezi výzkumem a průmyslem. Přesto několik menších projektů na našem území probíhá, ať již zmíněný projekt akumulace energie do vodíku v ÚJV Řež nebo například projekt vodíkové čerpací stanice v Neratovicích.

Dlouhodobým cílem Evropské unie je zvyšování podílu obnovitelných zdrojů na výrobě elektrické energie. Jelikož se většinou jedná o nestabilní zdroje energie závislé na meteorologických podmínkách, bude nutné hledat vhodné akumulační systémy. Jestli se akumulace energie do vodíku stane tím vhodným akumulačním systémem pro budoucnost energetiky, ukáží až následující roky a desetiletí.

## Použitá literatura

- [1] MASTNÝ, Petr a kolektiv autorů. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro*. 2011, **2011**(2), 5.
- [3] Přecherčpávací elektrárna Dlouhé Stráně. *Svět energie* [online]. 2016 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/powerplant/dlouhe-strane/dlouhestrane8.jpg>
- [4] ČENĚK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
- [5] Přecherčpávací vodní elektrárny v České republice. *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-09-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>
- [6] ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice*. Česká energetická agentura, 2006.
- [7] GATZEN, CH. The Economics of Power Storage. *Oldenbourg Industrieverlag, München*. (2008), 254 pages. ISBN 978-3-8356-3138-0
- [8] Supravodivost - princip a využití: Skladování energie. *O energetice* [online]. 2015 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: Supravodivost – princip a využití. Více na: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/supravodivost-princip-a-vyuziti/>
- [9] *Superkapacitory* [online]. České Meziříčí: Ecom [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf> Firemní dokumentace Ecom, s.r.o.
- [10] Vodík. Wikipedie [online]. [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>
- [11] KLIKORKA, Jiří, Bohumil HÁJEK a Jiří VOTINSKÝ. *Obecná a anorganická chemie*. 2. nezměn. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [12] TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. *Vodík*. Praha: Česká asociace technických plynů, 2004.
- [13] SOKANSKÝ, Karel. Palivové články v energetice [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, 2007 [cit. 2016-10-23].
- [14] DOUCEK, Aleš, Daniel TENKRÁT a Petr DLOUHÝ. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie. *Paliva*. **2011**(3), s.1-7.
- [15] BIČÁKOVÁ, Olga. Možnosti výroby vodíku biologickými procesy. *Paliva*. **2010**(2), s.103.
- [16] HADRAVA, Jan, Roman VOKATÝ, Tomáš HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby. *Paliva*. **2013**(5), 79-83.
- [17] JANÍK, Luděk, Aleš DOUCEK a Petr DLOUHÝ. *Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR* [online]. Husinec-Řež: Česká vodíková technická platforma, 2010 [cit. 2016-10-25].
- [18] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 8070806192.
- [19] Skladování vodíku I. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>

- [20] Skladování vodíku II. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Česká vodíková technologická platforma [online]. 2007 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [21] PORŠ, Zdeňek. *Palivové články* [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, 2002 [cit. 2017-01-24].
- [22] Palivový článek. *Wikipedie* [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%BD\\_%C4%8Dl%C3%A1nek](https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek)
- [23] ČERMÁKOVÁ, Jiřina, Lukáš POLÁK a Aleš DOUCEK. Vysokoteplotní palivové články. *Paliva*. 2013, **2013**(5), 63-70.
- [24] SVOBODA, Karel, Miloslav HARTMAN a Otakar TRNKA. Vysokoteplotní palivové články, vhodná paliva a možnosti jejich využití (I). *TZB-info* [online]. 2004 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1837-vysokoteplotni-palivove-clanky-vhodna-paliva-a-moznosti-jejich-vyuziti-i>
- [25] ŠTĚPÁNEK, Jakub. *Využití vodíku pro akumulaci energie z OZE*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [26] Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren. *Nazeleno* [online]. 2011 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektriny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elektraren.aspx>
- [27] PAIDAR, Martin. *Mikrokogenerační jednotky a technologie palivových článků* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2017-02-15].
- [28] Energy Storage in Belgium. *Energy Outlook* [online]. 2013 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://energy.sia-partners.com/energy-storage-belgium>
- [29] STEHLÍK, Karin. *Výzkum a vývoj v oblasti vodíkových technologiích v ČR a V4* [online]. Česká vodíková technologická platforma, 2015 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: [www.hytep.cz](http://www.hytep.cz)
- [30] Products & services. *Areva H2gen* [online]. [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.arevah2gen.com/en/products-services>
- [31] KOUSKSOU, T., P. BRUEL, A. JAMIL, T. EL RHAFIKI a Y. ZERAOULI. Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Elsevier, 2014, **2014**, 59-80.
- [32] *Electricity storage* [online]. SBC Energy Institute, 2013 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: [http://energystorage.org/system/files/resources/sbcenergyinstitute\\_electricitystoragefactbook.pdf](http://energystorage.org/system/files/resources/sbcenergyinstitute_electricitystoragefactbook.pdf)
- [33] HUSSEIN, Ibrahim a Adrian ILINCA. *Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies* [online]. Intech, 2013 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5772/52220>
- [34] ALOTTO, Piergiorgio, Massimo GUARNIERI a Federico MORO. Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, **2014**(29), 325-335.
- [35] V Řeži pomáhají urychlit nástup „vodíkové“ ekonomiky. *ÚJV* [online]. ÚJV Řež, 2015 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.ujv.cz/en/component/content/article?id=444:tiskov%C3%A1-zpr%C3%A1va>
- [36] Akumulace energie z OZE ve vodíku: ÚJV Řež představil podrobné výsledky projektu. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/77.php>
- [37] *Energiepark Mainz* [online]. Mainz, Germany [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.energiepark-mainz.de>
- [38] Utsira Wind Power and Hydrogen Plant. *IPHE Renewable Hydrogen Report* [online]. 2011, **2011** [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: [http://www.iphe.net/docs/Renew\\_H2\\_Ustira.pdf](http://www.iphe.net/docs/Renew_H2_Ustira.pdf)

- [39] *Nexa™ (310-0027) Power Module User's Manual* [online]. Revision: 0C. Ballard Power Systems, 2004 [cit. 2017-03-20]. MAN5100078.
- [40] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. Centrální výroba vodíku. *Chemické listy*. 2017, **2017**(111), 121-128.
- [41] KOLMANOVÁ, Marie. Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze. *Technik*. 2016, **2013**(3), 2-4.
- [42] KÖRNER, Alexander. *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells: Technical Annex* [online]. International Energy Agency, 2015 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: [https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/TechnologyRoadmapHydrogen\\_Annex.pdf](https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/TechnologyRoadmapHydrogen_Annex.pdf)
- [43] *Hogen GC 300 and 600: Laboratory hydrogen generators* [online]. Revision B. Wallingford: Proton Energy Systems, 2004 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: [www.protonenergy.com](http://www.protonenergy.com)
- [44] ULLEBERG, Øystein, Torgeir NAKKEN a Arnaud ETÉ. The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools. *Elsevier: International journal of hydrogen energy*. **2010**(35), 1841-1852.

## Seznam příloh

<b>Příloha A</b> Parametry modulu palivového článku NEXA Power Module [39] .....	63
<b>Příloha B</b> Parametry elektrolyzéru Hogen GC600 [43] .....	64

**Příloha A** Parametry modulu palivového článku NEXA Power Module [39]

<b>Výstup</b>	
Jmenovitý výkon	1200 W
Provozní rozsah napětí	22 až 50 V
Napětí při jmenovitém výkonu	26 V
Minimální doba pro dosažení jmenovitého výkonu ze studeného startu	2 min
Maximální Hlučnost	72 dB
Maximální produkce vody při jmenovitém výkonu	870 ml/h
Rozměry (cm)	56 x 25 x 33
Hmotnost	13 kg
Provozní životnost	1500 h
Počet provozních cyklů	500
<b>Vstup</b>	
Čistota dodávaného vodíku	99.99 %
Tlak vodíku	70 - 1720 kPa
Povolená teplota okolí	3 - 40 °C
Relativní vlhkost	0 - 95 %

## Příloha B Parametry elektrolyzéro Hogen GC600 [43]

Maximální průtok vodíku	0 - 600 cm <sup>3</sup> / min
Rozsah tlaku vyráběného vodíku	3 až 13,8 barg (45 až 200 psig); ± 5 % rozsahu výstup (FSO), <0,5 ppm vodní páry
Analýza produktu	< 1 ppm kyslíku < 10 ppm vodní páry < 1ppm uhlovodíky / halogenové uhlovodíky
Čistota produkovaného vodíku	99,9999%
Obsah zásoby vodíku	< 0,1 g vodíku obsaženého v systému
Specifické vlastnosti deionizované vody	> 1 MΩ cm (< 1 μS/cm) nebo lepší
Objem nádrže pro deionizovanou vodu	1,9 l
Spotřeba deionizované vody	0,6 cm <sup>3</sup> /min při plném výkonu tomu odpovídá 0,9 l za 24 h provozu
Doba provozu na jedno naplnění nádržky s deionizovanou vodou	> 50 h
Příkon	< 1200 W
Napájení	~ 100 - 240 V, 47 - 63 Hz
Rozměry (cm)	23 x 52 x 37
Hmotnost	23 kg
rozsah povolené okolní teploty	10 až 35 °C
Maximální vlhkost vzduchu	80 % RH
Výchylka od úrovně	±3 °C maximálně
Doporučené větrání	> 0,6 m <sup>3</sup> / min
Ovládání	Nastavitelný požadovaný tlak, dálkový konektor alarmu. Ovládání parametrů klávesnicí.
Nastavení	Tlak, displej, napájení, generování, údaje o náplni, stav (chyba #)
Varování	Údaje o náplni, Interní nebo externí únik vodíku zjištěný nastavenou hodnotou v čase
Vypnutí	špatná kvalita vody, nízká hladina vody, napětí článku stacku, teplota čističky, ztráta ventilace skříně